



**João Gonçalo Canto
Matos Coelho**

**AVALIAÇÃO DE GEOMETRIA COM
CONFIGURAÇÃO WIPER EM FERRAMENTA DE
FURAÇÃO COM PASTILHAS INTERCAMBIÁVEIS**



**João Gonçalo Canto
Matos Coelho**

**AVALIAÇÃO DE GEOMETRIA COM
CONFIGURAÇÃO WIPER EM FERRAMENTA DE
FURAÇÃO COM PASTILHAS INTERCAMBIÁVEIS**

Projeto curricular apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizado sob a orientação científica do Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

o júri

Presidente

Prof. Doutor Carlos Alberto Moura Relvas
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogal – Arguente principal

Prof. Doutor Rui Pedro Cardoso da Silva Martinho
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Vogal - Orientador

Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva
Professor Associado com Agregação da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Gostaria de prestar o devido agradecimento:

Ao meu orientador, Professor Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva, por todo o apoio, motivação, orientação e disponibilidade, assim como pela partilha de conselhos e conhecimentos.

À Palbit e a todos os seus colaboradores com quem muito prezei trabalhar, particularmente ao Engenheiro Daniel Figueiredo e Engenheiro Renato Ferreira, por me acolherem e guiarem na elaboração deste projeto, pela amizade, disponibilidade e partilha de conhecimento.

Aos meus amigos e colegas por todo o incentivo, ajuda e apoio oferecido, não só durante este projeto, mas em todo o meu percurso académico.

À minha namorada pelo apoio, amizade, disponibilidade, confiança, paciência e sugestões proferidas durante o projeto.

À minha família que sempre esteve ao meu lado, nos bons e maus momentos, prestando-me um apoio e motivação incondicional para atingir os meus objetivos e realizar os meus sonhos.

palavras-chave

Furação, pastilhas intercambiáveis, geometria da ferramenta, aresta de corte, apara, potência de maquinação, vibração, acabamento de superfície, Wiper (aresta alisadora)

resumo

A furação com pastilhas intercambiáveis (indexáveis) tem surgido na indústria como uma alternativa eficiente a brocas inteiriças, evidenciando um aumento da produtividade.

O presente trabalho, sendo um projeto inserido no Gabinete Técnico de Investigação e Desenvolvimento da Palbit S.A., propõe-se a divulgar uma análise comportamental de ferramentas de referência do mercado, bem como um estudo comparativo da influência da geometria Wiper no desempenho de uma ferramenta na furação de aço AISI 4337.

Na análise comportamental, foram ensaiadas três brocas com pastilhas diferentes, realizando furos com condições de corte variáveis. Foi escolhida uma ferramenta para a adição da geometria Wiper, sendo esta projetada com este pormenor geométrico, fabricada, ensaiada e, posteriormente, efetuada a comparação dos resultados obtidos com a sua semelhante.

Em ambas as fases, foram avaliados aspetos importantes num processo de furação: formação e controlo da apara, potência despendida para realização do corte, controlo de vibrações e acabamento da superfície.

Foi concluído que, com a adição da geometria Wiper à ferramenta escolhida com as condições de trabalho impostas, existe uma diminuição de vibrações e uma melhoria do acabamento superficial, em detrimento do aumento de potência exigida para efetuar o corte.

keywords

Drilling, interchangeable inserts, tool geometry, cutting edge, chip, machining power, vibration, surface finish, Wiper

abstract

Drilling with interchangeable (indexable) inserts has emerged in the industry as an efficient alternative to solid drills, evidencing an increase in productivity. The present work, being a project inserted in the Technical Office of Investigation and Development of Palbit S.A., proposes to disclose a behavioral analysis of market reference tools, as well as a comparative study of the influence of Wiper geometry on the performance of a tool in the process of drilling AISI 4337 steel.

In the behavioral analysis, three drills with different inserts were tested by drilling holes varying the cutting conditions. A tool was chosen for the addition of Wiper geometry, which was designed with this geometric detail, fabricated, tested and compared the results obtained with its similar.

In both phases, important aspects were evaluated in a drilling process: chip formation and control, power required for cutting, vibration control and surface finishing.

It was concluded that, with the addition of Wiper geometry to the chosen tool with the imposed working conditions, a reduction of vibrations and an improvement of the surface finish were obtained, in detriment of the increase in the power required to make the cut.

.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Caracterização do Problema.....	2
1.3. Objetivos	2
1.4. Apresentação da empresa PALBIT S.A.	3
1.5. Estrutura do Documento.....	4
2. Furação, Fundamentos Teóricos e Estado de arte.....	5
2.1. Conceitos básicos do processo de furação	5
2.2. Furação com pastilhas intercambiáveis.....	11
2.2.1. Apara formada na furação com pastilhas indexáveis	15
2.2.2. Vibrações.....	16
2.3. Integridade superficial.....	18
2.3.1. Geometria da aresta alisadora.....	20
2.4. Introdução ao projeto realizado	23
3. Procedimento experimental	25
3.1. Ferramentas utilizadas.....	25
3.1.1. Ferramenta 1.....	26
3.1.2. Ferramenta 2.....	27
3.1.3. Ferramenta 3.....	27
3.2. Ensaios iniciais.....	28
3.2.1. Condições de corte	29
3.2.2. Realização dos ensaios.....	30

3.2.3.	Recolha dos parâmetros de comparação	33
3.3.	Levantamento da forma geométrica dos componentes	34
3.3.1.	Pastilha de corte	34
3.3.2.	Corpo da broca	35
3.3.3.	Aparelhos utilizados	36
3.4.	Modelação dos componentes	39
3.5.	Desenho técnico	45
3.6.	Fabrico dos componentes	46
3.7.	Ensaio finais	47
4.	Análise e discussão de resultados	49
4.1.	Resultados dos ensaios iniciais	49
4.1.1.	Formação da apara	49
4.1.2.	Potência consumida pela máquina-ferramenta.....	51
4.1.3.	Precisão dimensional do diâmetro do furo	54
4.1.4.	Acabamento de superfície da parede do furo	57
4.1.5.	Conclusões e escolha da ferramenta.....	59
4.2.	Resultados dos ensaios finais	60
4.2.1.	Formação da apara	60
4.2.2.	Potência consumida pela máquina-ferramenta.....	62
4.2.3.	Precisão dimensional do diâmetro do furo	63
4.2.4.	Qualidade superficial da parede do furo.....	65
5.	Considerações Finais	71
5.1.	Conclusões	71
5.2.	Trabalhos futuros.....	74
	Referências Bibliográficas	77

Anexos.....	83
-------------	----

Índice figuras

Figura 1: Exemplo de uma broca inserida numa máquina-ferramenta vertical [7].....	5
Figura 2: Tipos de furação [1] (adapt.).....	6
Figura 3: Movimentos durante a operação de furação [1] (adapt.)	7
Figura 4: Estudos comparativos entre diferentes tipos de brocas [17] (adapt.).....	8
Figura 5: Tipos de apara [8]	10
Figura 6: Forma da apara normalmente formada em processos de furação [7]	10
Figura 7: Forma da apara com a adição de entalhes na aresta de corte [16] (adapt.).....	11
Figura 8: Exemplar da extremidade de uma broca com pastilhas intercambiáveis [20] (adapt.)....	12
Figura 9: Posição das pastilhas durante o corte [23] (adapt.).....	13
Figura 10: Vista de topo da broca demonstrando o ângulo de balanceamento [23] (adapt.)	14
Figura 11: Furo oval criado devido à não anulação de forças radiais (vibrações) [23].....	14
Figura 12: Tipos de pastilhas utilizados na experiência: a) ferramenta possuiu pastilha central quadrada e periférica em losango, b) ferramenta possui pastilha em forma <i>Trigon</i> (PVD, CVD e sem revestimento) [15] (adapt.)	15
Figura 13: Forma da apara com paragem explosiva da rotação da ferramenta: a) ferramenta A, b) ferramenta B [15] (adapt.).....	16
Figura 14: Superfície onduladas helicoidais: a) Ondas em fase, b) Ondas desfasadas [20].....	17
Figura 15: Análise de vibrações com alterações de Wang: a) vibração segundo eixo z da ferramenta não modificada, b) vibração segundo eixo x da ferramenta não modificada, c) vibração segundo eixo z da ferramenta modificada, d) vibração segundo eixo x da ferramenta modificada [24].	18
Figura 16 Superfície real e nominal [31] (adapt.)	19
Figura 17: Imagem recolhida por microscópio analisando amplitudes [32]	19

Figura 18: Geometria <i>Wiper</i> [3]	21
Figura 19: Análise de rugosidade de geometria <i>Wiper</i> vs Convencional: a) <i>Wiper</i> com 2Vf, b) <i>Wiper</i> com Vf, c) convencional com Vf [38] (adapt.).....	21
Figura 20: Desgaste de pastilha: a) convencional, b) <i>Wiper</i> [39].....	22
Figura 21: Pastilha e ponta da broca da ferramenta 1 (cortesia da Palbit)	26
Figura 22: Pastilha central/periférica da ferramenta 2 (cortesia da Palbit)	27
Figura 23: Pastilha periférica da ferramenta 3 (cortesia da Palbit)	27
Figura 24: Pastilha central da ferramenta 3 (cortesia da Palbit).....	27
Figura 25: Máquina-ferramenta utilizada em todos os ensaios realizados (cortesia da Palbit).....	28
Figura 26: Esquema de obtenção das condições de corte a fornecer à máquina-ferramenta.	30
Figura 27: Preparação dos ensaios: a) material de trabalho devidamente preparado e apertado, b) exemplo do código imposto à máquina ferramenta, c) definição do ponto de referência da peça, d) obtenção da altura e raio da ferramenta (cortesia da Palbit).	31
Figura 28: Visualização da potência despendida pela máquina-ferramenta (cortesia da Palbit).	32
Figura 29: Armazenamento das aparas recolhidas de cada ensaio realizado.	32
Figura 30: Medição do diâmetro do furo com Micrómetro de furos (cortesia da Palbit).....	33
Figura 31: Medição de rugosidade (Ra) com sistema de contacto (rugosímetro) (Cortesia da Palbit).	34
Figura 32: Esboço de uma pastilha representando algumas cotagens e conceitos necessários para a sua modelação	35
Figura 33: Comparador de alturas (cortesia da Palbit).....	37
Figura 34 . Mitutoyo PJ-A3000 Vertical Profile (cortesia da Palbit).....	38
Figura 35: Zoller venturion 450 (cortesia da Palbit).	38
Figura 36: Micro-Vu Vertex Multisensor Measuring Center (cortesia da Palbit).....	39

Figura 37: ZEISS DuraMax (cortesia da Palbit).....	39
Figura 38: Modelação da pastilha: a) aresta alisadora tangente ao raio de ponta, b) geometria do quebra-aparas, boleamentos presentes na pastilha, aresta viva da aresta de corte e pormenores da pastilha, c) e d) pastilha final.	40
Figura 39: Modelo de broca utilizado com entidades referentes ao acoplamento no cone SK50. ...	41
Figura 40: Plano de trabalho com pastilhas fixas nos planos de encosto.	42
Figura 41: Ângulo radial na pastilha periférica.	43
Figura 42: Ângulo axial da pastilha central.....	44
Figura 43: Broca final projetada.....	45
Figura 44: Alojamento da pastilha periférica.	45
Figura 45: Aparas da ferramenta 1: a) aparas recolhidas no ensaio com $V_c=120$ m/min e $f_z=0,06$ mm/rot, b) aparta em fita enrolada em torno da ferramenta.	50
Figura 46: Aparas da ferramenta 2: a) aparta recolhida no ensaio com $V_c=160$ m/min e $f_z=0,08$ mm/rot, b) aparta em arco formada no ensaio com $V_c=200$ m/min e $f_z=0,06$ mm/rot.	51
Figura 47: Aparas obtidas da ferramenta 3 no ensaio com $V_c=200$ m/min e $f_z=0,08$ mm/rot.	51
Figura 48: Gráfico comparativo de Potência consumida com V_c 120 m/min	52
Figura 49: Gráfico comparativo de Potência consumida com V_c 160 m/min	53
Figura 50: Gráfico comparativo de Potência consumida com V_c 200 m/min	53
Figura 51: Gráfico comparativo da variação do diâmetro do furo com V_c 120 m/min	55
Figura 52: Gráfico comparativo da variação de diâmetro do furo com V_c 160 m/min	55
Figura 53: Gráfico comparativo da variação de diâmetro do furo com V_c 200 m/min	56
Figura 54: Gráfico comparativo da Rugosidade média aritmética (R_a) com V_c 120 m/min	58
Figura 55: Gráfico comparativo da Rugosidade média aritmética (R_a) com V_c 160 m/min	58

Figura 56: Gráfico comparativo de Rugosidade média aritmética (Ra) com Vc 200 m/min	58
Figura 57: Aparas recolhidas com ferramenta 4.	61
Figura 58: Aglomerado da apara em arco (ensaio Vc=200 m/min e fz=0,06 mm/rot) que não foi extraído da zona de corte sem danificar a parede do furo.	61
Figura 59: Gráfico comparativo de potência consumida com Vc 120 m/min das ferramentas 2 e 4.	62
Figura 60: Gráfico comparativo de potência consumida com Vc 160 m/min das ferramentas 2 e 4.	63
Figura 61 Gráfico comparativo de potência consumida com Vc 200 m/min das ferramentas 2 e 4	63
Figura 62: Gráfico comparativo da variação de diâmetro do furo com Vc 120 m/min das ferramentas 2 e 4	64
Figura 63: Gráfico comparativo da variação de diâmetro do furo com Vc 160 m/min das ferramentas 2 e 4	65
Figura 64: Gráfico comparativo da variação de diâmetro do furo com Vc 200 m/min das ferramentas 2 e 4	65
Figura 65: Gráfico comparativo de Rugosidade média aritmética com Vc 120 m/min das ferramentas 2 e 4	66
Figura 66: Gráfico comparativo de Rugosidade média aritmética com Vc 200 m/min das ferramentas 2 e 4.	67
Figura 67: Gráfico comparativo de Rugosidade média aritmética com Vc 160 m/min das ferramentas 2 e 4	67
Figura 68: Eletroerosão a fio através de plano coincidente com eixo do furo. Furo 1 realizado pela ferramenta 4, furo 2 realizado pela ferramenta 2.	68
Figura 69: Superfície ampliada 100x da parede do furo: a) ferramenta 2, b) ferramenta 4 (cortesia do IPN)	69
Figura 70: Análise 2D do perfil de rugosidade obtido da ferramenta 2 (cortesia do IPN).....	70

Figura 71: Análise 2D do perfil de rugosidade obtido da ferramenta 4 (cortesia do IPN).....	70
---	----

Índice tabelas

Tabela 1: Variação do diâmetro do furo com a utilização de diferentes tipos de brocas [22] (adapt.).	13
Tabela 2: Características das ferramentas fornecidas.....	26
Tabela 3: Especificações da máquina-ferramenta utilizada	28
Tabela 4: Condições de corte dos ensaios decorridos. Interliga 3 velocidades de corte com 4 avanços por rotação distintos	29
Tabela 5: Aprovação do controlo da apara.....	49
Tabela 6: Potência consumida registada durante os ensaios da ferramenta 2	52
Tabela 7: Análise da potência consumida por cada Vc (120 / 160 / 200 m/min).....	54
Tabela 8: Diâmetros do furo medidos em cada ensaio da ferramenta 2.....	54
Tabela 9: Diâmetro real das ferramentas.....	55
Tabela 10: Valores recolhidos de Ra da superfície do furo realizado pela ferramenta 2.	57
Tabela 11: Potência consumida pela máquina-ferramenta durante os ensaios da ferramenta 4.....	62
Tabela 12: Valores recolhidos de diâmetro do furo efetuado pela ferramenta 4.....	64
Tabela 13: Valores recolhidos de Ra da parede do furo efetuado pela ferramenta 4.	66
Tabela 14: Parâmetros de rugosidade recolhidos dos 2 furos	70

Abreviaturas e Simbologia

'	Minuto (unidade de ângulo)
°	Graus (unidade de ângulo)
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
AA	Aresta alisadora
AISI	American Iron and Steel Institute
CAD	Computer-aided design (desenho assistido por computador)
CAM	Computed-aided manufacturing
CC	Condições de corte
CVD	<i>Chemical Vapour Deposition</i>
D	Diâmetro da ferramenta
Dc	Diâmetro do furo
Fr	Força radial
Ft	Força tangencial
Fz	Força de avanço
fz	Avanço por rotação
kW	kiloWatt
L	Comprimento útil da ferramenta
M	Binário
min	Minuto (unidade de tempo)
ML	Quantidade mínima de lubrificação
<i>n</i>	Velocidade de rotação da ferramenta
PCBN	Polycrystalline cubic boron Nitride
Ps	Pressão específica de corte
PVD	<i>Physical Vapour Deposition</i>
Q	Quantidade removida de material
Ra	Rugosidade média aritmética
rot	Rotação(ões)
Rp	Pico máximo de amplitude
Rq	Raiz quadrada média de rugosidade
Rt	Variação máxima de amplitude
Rv	Pico mínimo de amplitude
Rz	Variação média de amplitude
Vc	Velocidade de corte
Vf	Velocidade de avanço da ferramenta (eixo z)
α_1	Ângulo aresta de corte inferior
α_2	Ângulo aresta de corte lateral
Kr	Ângulo da aresta de corte inferior relativamente a eixo x em furação

1. Introdução

1.1. Enquadramento

A furação é considerada como um dos três principais processos de arranque de apara, a par da fresagem e torneamento. Vários estudos indicam que a furação é uma das operações de corte de metal mais consumidoras de tempo. É estimado que 40% do tempo de trabalho de uma máquina-ferramenta são despendidos na realização de furos, produzindo 60% das aparas formadas. Assim sendo, um melhor entendimento e, conseqüentemente, uma melhoria da ferramenta originaria um alto desempenho, reduzindo significativamente os custos da realização de furos numa indústria [1].

Com a evolução na indústria metalomecânica, máquinas de alta tecnologia com maior rigidez, potência, precisão e capacidade de rotação apareceram, permitindo a elevação das condições de corte e um aumento da produtividade. É exigido a investigação constante e desenvolvimento de ferramentas associadas a estes equipamentos. Tem sido investigado o desempenho das ferramentas de corte com o intuito de estender potencialmente a sua vida útil e a melhoria da qualidade da peça maquinada [2].

Um dos objetivos principais da indústria que utiliza este tipo de manufatura é aumentar a velocidade de avanço da broca na peça de trabalho. Em média, a indústria raramente requer mais de 8% dos custos totais de produção em ferramentas de corte, tendo o maior gasto no tempo de maquinação [3]. O aparecimento de brocas com pastilhas intercambiáveis (ou indexáveis) ofereceu diversas vantagens durante a maquinação, tal como a elevada remoção de material, reduzindo o tempo de furação até 90%. O aparente preço alto inicial deste tipo de broca é compensado pela grande produtividade e baixo-custo de substituição das pastilhas [4]. É essencial a existência de técnicas de otimização para responder à competição e exigência do mercado, embora que sejam dispendiosas. Para contrariar os custos, têm sido desenvolvidos modelos matemáticos que consigam simular estes processos [5].

Com vista na melhoria do acabamento das superfícies a altas velocidades de corte, foi introduzido em 1950 para torneamento (tendo sido previamente utilizada em fresagem) a geometria da aresta alisadora (AA) (usualmente tratado por geometria *Wiper*). Na altura observou-se uma melhoria no acabamento da peça, mas contribuiu com dois problemas graves: aumento de vibrações e a necessidade da AA em ser paralela ao eixo de rotação da árvore. A falta de rigidez das máquinas-ferramenta e a imprecisão do fabrico das ferramentas limitaram o uso desta geometria. Hoje em dia,

com máquinas mais rígidas e pastilhas intercambiáveis com tolerâncias muito apertadas já é possível adotar esta tecnologia de forma mais eficiente [1].

1.2. Caracterização do Problema

Sendo este trabalho um projeto realizado na empresa Palbit S.A., enquadra-se com a necessidade desta na continuação da competitividade com os seus concorrentes diretos. No seu planeamento, pretende desenvolver uma ferramenta de furação para combater os avanços da indústria na maquinação de aços ligados. Esta nova ferramenta (broca de pastilhas intercambiáveis, com quatro arestas de corte em cada pastilha) tem como objetivo o estabelecimento de um novo patamar relativamente ao acabamento de superfície da parede do furo.

1.3. Objetivos

É pretendido com este trabalho avaliar a influência da geometria da aresta de corte com um detalhe geométrico denominado por AA na operação de furação com pastilhas intercambiáveis através de ensaios em aço AISI 4337 (DIN 34 CrNiMo 6).

Existem duas fases distintas neste projeto. A primeira remete-se à avaliação do estado de arte e ferramentas existentes, sendo uma escolhida para acolher o pormenor geométrico. A segunda fase é o estudo comparativo entre a ferramenta escolhida e a incorporada com a AA.

Para poder efetuar a primeira fase, pretende-se recolher critérios/parâmetros comparativos que sejam influenciados pelas condições de corte e geometria da ferramenta, retratando aspetos importantes na furação. Com três ferramentas de corte fornecidas pela Palbit, tendo uma delas a funcionalidade de padrão de comparação, tem-se como objetivo a realização de vários ensaios de furação, com refrigeração interna e variando as condições de corte. As ferramentas utilizadas possuem pastilhas com diferentes geometrias. Os aspetos importantes estudados são os seguintes:

- Formação e controlo da apara;
- Potência despendida pela máquina-ferramenta;
- Controlo de vibrações;
- Acabamento da superfície do furo.

Após a recolha dos parâmetros, é desejado a realização de uma avaliação comparativa que sirva como fundamento para a escolha da ferramenta que irá ser modificada, podendo potencializar o seu desempenho.

Para realizar a segunda fase do projeto, é necessário o fabrico da ferramenta, incluindo a pastilha de corte e o corpo da broca. É pretendido a modelação dos componentes num software CAD, adicionando a AA. Para que isto seja conseguido, é recolhida informação geométrica da forma da pastilha e broca, recolhendo cotas chave e pormenores, com recurso a equipamentos apropriados instalados no espaço de produção da fábrica.

Com o fabrico da pastilha e da broca previamente projetadas, propõe-se a execução de novos ensaios, adquirindo os critérios de comparação para esta nova ferramenta. Estes ensaios adicionais possuem as mesmas condições de corte dos ensaios preliminares. É pretendido uma avaliação credível e fundamentada pelos critérios de comparação, de modo a que a incorporação da AA seja apreciada.

1.4. Apresentação da empresa PALBIT S.A.

A Palbit, S.A. é uma sociedade anónima do sector da metalomecânica, situada no concelho de Albergaria-a-Velha, que tem como principais atividades o desenvolvimento, a produção e comercialização de produtos/ferramentas em metal duro, materiais ultraduros e aço. Apresenta-se no mercado como um fornecedor de soluções de ferramentas de corte, com mais de 50 anos de experiência no setor. A Palbit procura oferecer ferramentas da mais alta qualidade, disponibilizando uma vasta gama de soluções para os seus clientes. Atualmente, a Palbit atua em três áreas principais de negócio:

- Ferramentas de corte por arranque de apara para toda a indústria (pastilhas para suporte de fresagem, fresas e suportes para operações de torneamento, *grooving*, corte de canal e roscagem, etc.)
- Produtos anti desgaste (fieiras, mandris, punções, matrizes, contactos elétricos, etc.)
- Produtos de metal duro incorporado no aço para a indústria mineira (barrenas, enraideiras, bits, etc.) e pedreiras (bujardas, cinzeis, lâminas, etc.)

Apesar do universo mineiro ter sido a origem de tudo o que é hoje, o volume de negócios dos produtos relacionados com minas e pedreiras representa menos de 10% do total faturado. Por outro lado, relativamente a ferramentas de corte (representando mais de 85% do volume de negócio),

a empresa ombreia hoje em dia com os maiores *players* mundiais na produção de pastilhas em metal duro.

A empresa engloba em si um valor acrescentado, muito vincado e com grande componente tecnológica (tecnologia de processamento de pós, sinterização, revestimento, produção de suportes em aço, etc.), permitindo-lhe cumprir requisitos de tolerância extremamente apertados com grande qualidade. Tem implementado um sistema de controlo de qualidade que acompanha todas as fases do processo produtivo, certificado pela ISO 9001:2008, contando com um sistema de gestão de IDI certificado – NP 4457, salvaguardando a excelência do produto final. [6]

1.5. Estrutura do Documento

Primeiramente, existe um enquadramento teórico do tema proposto e uma revisão do estado de arte. Para cada tema, é apresentado um fundamento teórico e a incorporação de estudos realizados por outros autores, sendo que este documento assenta sobre algumas conclusões fornecidas por estes.

De seguida, o procedimento experimental realizado para a obtenção dos objetivos propostos. Notar que, ao existir duas fases diferentes do projeto, também o procedimento experimental se encontra por fases, mas é exposto no mesmo capítulo de forma a uma melhor compreensão do leitor. Todos os pormenores que influenciem o método utilizado são expostos e explicados.

Seguidamente, são expostos os parâmetros comparativos recolhidos e a sua análise, quer para os ensaios iniciais, quer para os finais. Por fim, uma conclusão detalhada de todo o trabalho realizado.

2. Furação, Fundamentos Teóricos e Estado de arte

2.1. Conceitos básicos do processo de furação

O processo de furação consiste numa operação de maquinação ao realizar furos utilizando uma ferramenta de furação (broca). Normalmente, quando trabalhando em máquinas-ferramenta, a peça a maquinar é apertada na mesa de trabalho da máquina com uma prensa ou qualquer outro sistema de aperto, impedindo o seu movimento em qualquer direção. A broca é apertada ao cone que será preso no fuso rotativo da máquina. (Figura 1) [7].



Figura 1: Exemplo de uma broca inserida numa máquina-ferramenta vertical [7]

A broca é definida como sendo uma ferramenta de corte final, projetada para uma das operações de furação (Figura 2). Tal ferramenta tem uma extremidade terminal (de trabalho) e a extremidade posterior para a união no suporte de ferramentas [7].

Foram inventados inúmeros tipos de brocas, tendo sido o mais evidente a criação de Steven A. Morse em 1863, a broca helicoidal (*twist drill*) (patente americana nº28). Foram investigadas variadas geometrias e manufaturas, podendo ser agrupadas em grupos classificados baseados [1]:

- na construção;
- na configuração do alongador;
- no rácio comprimento/diâmetro;

- no número de hélices (cavidade por onde a pira é extraída);
- no fornecimento de refrigerante;
- no balanço das forças;
- nas funções e aplicações.

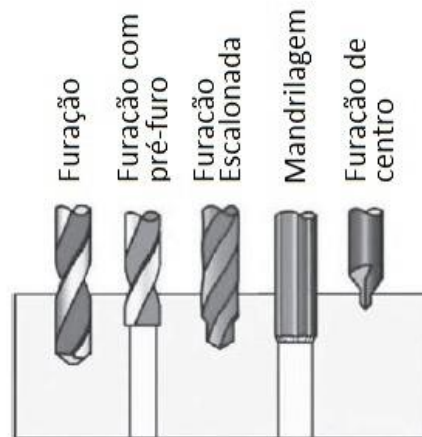


Figura 2: Tipos de furação [1] (adapt.)

Na análise racional de qualquer processo de maquinação é indispensável o estabelecimento de conceitos básicos sobre os movimentos e as relações geométricas. Torna-se necessário a sua uniformização, o que tem sido feito pelas principais associações de normas técnicas (DIN 6580-1963 e ISO 3002-1977) [8].

Em todas as operações de furação, o movimento primário é a rotação da peça de trabalho ou da ferramenta, sendo o movimento secundário o avanço em translação (Figura 3). Estes podem ser aplicados à ferramenta ou à peça de trabalho, dependendo do desenho particular da máquina-ferramenta utilizada [7]. Estes movimentos e a sua parametrização (definição de valores das velocidades) definem as condições de corte do furo a ser efetuado.

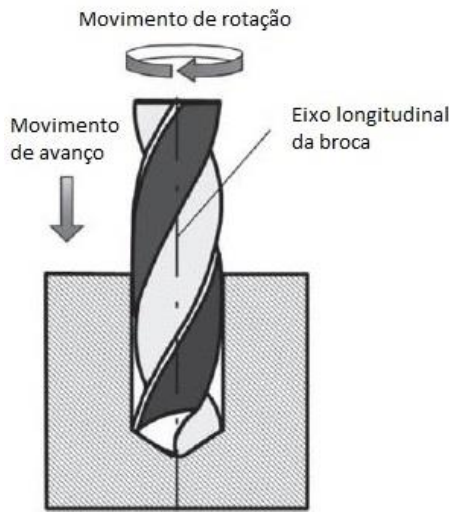


Figura 3: Movimentos durante a operação de furação [1] (adapt.)

As seguintes equações traduzem a informação necessária a fornecer à máquina-ferramenta, sendo n a velocidade de rotação da árvore e V_f a velocidade de avanço da ferramenta [9].

- $V_c = \frac{D_c * \pi * n}{1000}$ (m/min) (1)

- $V_f = f_z * n$ (mm/min) (2)

- $Q = \frac{D_c * f_z * V_c}{4}$ (cm³/min) (3)

onde:

V_c é a velocidade de corte (na periferia) [m/min]

D_c é o diâmetro do furo [mm]

n é a rotação da árvore [rpm]

f_z é o avanço por rotação [mm/rot]

Q é a quantidade removida de material [cm³/min]

A interação entre a peça (material a ser maquinado) e a ferramenta origina o aparecimento de forças de contacto, responsáveis pelo arranque da apar. Apesar destas atuarem numa área de contacto, é simplificado o processo ao utilizar apenas um ponto [8]. A maioria das operações de maquinação são a três dimensões e geometricamente complexas, sendo utilizado o modelo ortogonal a duas dimensões para explicar a remoção de material. Os modelos de simulação utilizados requerem

que se faça esta transformação de forma a eliminar variáveis [10]. Apesar disso, o modelo ortogonal não é aplicado a muitos casos práticos, tais como a inclusão do raio de ponta, quebra-aparas ou ângulo lateral da aresta de corte. Para Olson et al [11], o modelo ortogonal não é aplicado em furação. É requerido a execução de experiências para identificar parâmetros constantes, tais como a interferência entre o material da peça de trabalho e a geometria da ferramenta [10].

Com a ferramenta em contacto com a peça, originam-se três forças na aresta de corte: Força tangencial (F_t), força de avanço (F_z), e força radial (F_r) [10]. Num processo de furação, por conveniência, as forças resultantes são expostas de acordo com o sistema de coordenadas presente na ferramenta. As forças, em conjunto com diversos fatores, irão se transformar de acordo com os movimentos feitos na operação. Na furação existem dois movimentos, a rotação e o avanço da ferramenta, originando o binário (M) e força de avanço (F_z), respetivamente [7]. A potência necessária para efetuar o corte é obtida através da multiplicação da força resultante pela velocidade [8].

O binário e a força de avanço dependem de um alargado leque de fatores, tais como o estado metalúrgico e propriedades mecânicas do material, *design* da ferramenta, refrigeração, entre outras particularidades que possam existir [7]. Estas duas forças são utilizadas como critério de comparação de estudos existentes, avaliando diferentes configurações de brocas. Na Figura 4 encontra-se uma avaliação comum utilizada.

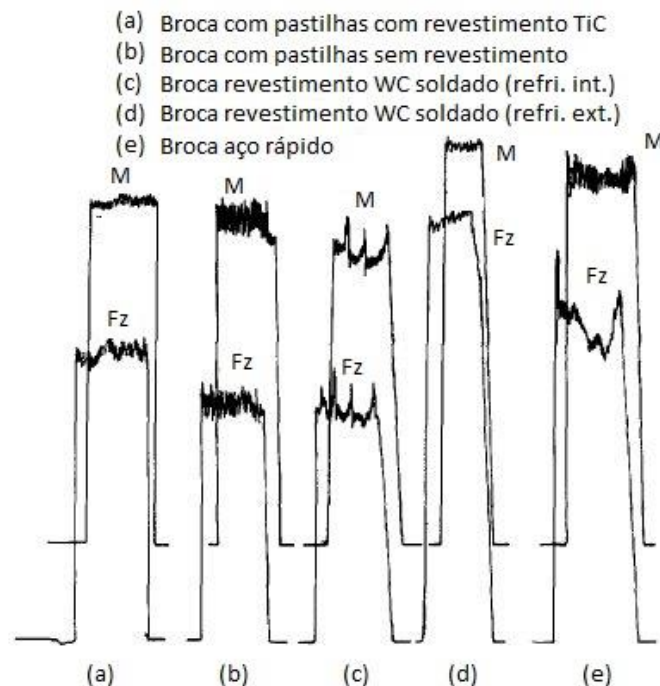


Figura 4: Estudos comparativos entre diferentes tipos de brocas [17] (adapt.).

Davim [8], sintetiza algumas ideias gerais sobre os parâmetros não diretamente relacionados com as forças presentes no esquema mecanicista, mas que contribuem com influência na pressão específica de corte P_s (força de corte pela área da apara em corte).

- Secção da apara;
- Velocidade de corte;
- Fluido de corte;
- Geometria da ferramenta.;
- Estado da afiação da ferramenta;
- Rigidez da ferramenta.

Shaw [12] afirma que um importante problema se concentra na forma das aparas produzidas na maquinação. Segundo Alisson Machado et al [13], este estudo tem vindo a proporcionar grande avanço no processo de maquinação e contribuído para um aperfeiçoamento das arestas de corte, além de novos e mais eficazes materiais para ferramentas, possibilitando a maquinação dos mais variados tipos de materiais. A apara é formada a altíssimas velocidades de deformação, seguidas de rotura do material da peça. No caso da furação, a apara formada é escoada pelas hélices do corpo da ferramenta. Para um estudo mais detalhado, divide-se o processo da formação da apara em quatro eventos diferentes:

- Recalque inicial;
- Deformação e rotura;
- Deslizamento das lamelas;
- Escoamento da apara.

Referente aos tipos de apara, esta pode apresentar-se, fundamentalmente, em três tipos, presentes na Figura 5. Quanto à forma da apara, a norma ISO 3685 é utilizada para poder fazer a sua classificação para torneamento [8]. Não existe uma norma padrão para a apara formada em processos de furação, sendo necessário uma relação com o torneamento, encontrando-se na Figura 6 a forma da apara corrente em furação. A forma cónica tem origem na variação da velocidade de corte ao longo da aresta.



Figura 5: Tipos de aparta [8]

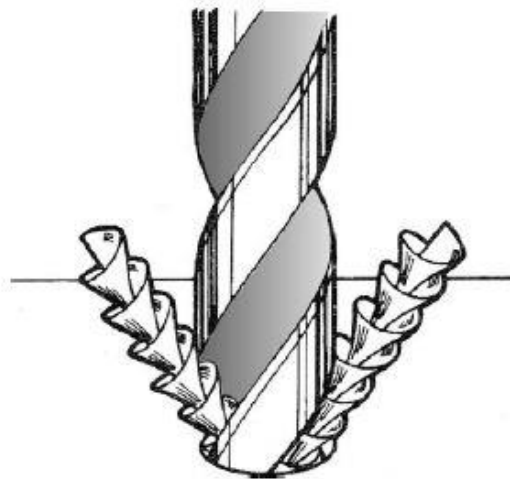


Figura 6: Forma da aparta normalmente formada em processos de furação [7]

Jawahir et al [14] apresentaram um resumo dos tipos, formas e controlo da aparta em torneamento, furação e fresagem. O trabalho inclui os estudos de aparas realizados por Venkatesh et al [15] com brocas de pastilhas intercambiáveis, que irão ser aprofundados no capítulo 2.2.1.

Ogawa et al [16] estudaram os efeitos causados por entalhes de separação da aparta inseridos nas arestas de corte da broca de aço rápido. A aparta formada na broca convencional não era constante, originando forças excessivas, rebarba e piores acabamentos. Obtiveram melhores resultados na qualidade do furo e das forças presentes com as alterações, mas, em materiais dúcteis, a aparta tinha

dificuldades na fratura, formando apara em fita longa (Figura 7). Aconselharam a utilização de furação “pica-pau” ao utilizar esta configuração.

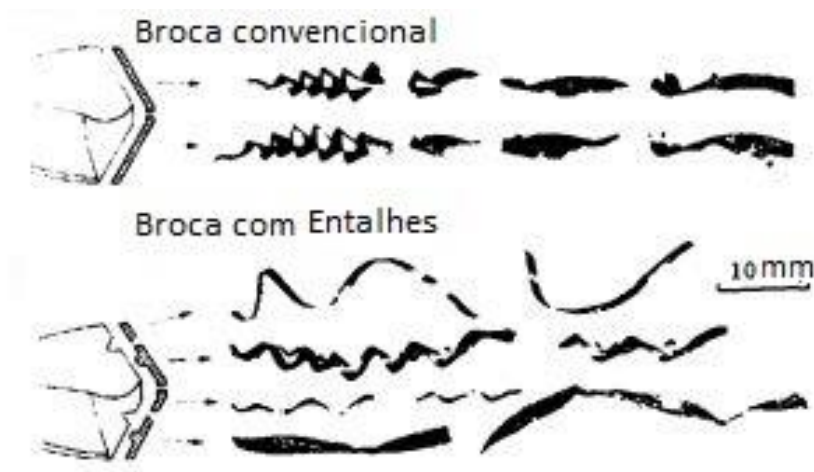


Figura 7: Forma da apara com a adição de entalhes na aresta de corte [16] (adapt.)

Astakhov [7] apresentou um estudo sobre furação, incluindo a formação da apara. A melhor, e mais eficaz, maneira de quebrar a apara é realizada com alterações na face de ataque. Este apresenta diversos estudos e patentes criados com intuito de conseguir que a apara se solte do material de trabalho sem constrangimentos. A maioria dos estudos apresentavam entalhes/quebra-apanas na face de ataque. Se a apara não for quebrada, irá colidir com as paredes do furo, originando estragos.

2.2. Furação com pastilhas intercambiáveis

Tradicionalmente, a furação tem sido praticada como um processo de desbaste no corte de metal, sendo a utilização de mandris considerada indispensável se uma melhor qualidade superficial do furo for desejável. Contudo, com a chegada de brocas com pastilhas intercambiáveis passou a ser convencional a realização de furos como processos de semi-acabamento ou, até mesmo, de acabamento [17].

Furação com pastilhas intercambiáveis tem ficado tão eficiente e com baixo custo que, em vários casos, é menos dispendioso realizar um furo em vez de incorporar componentes adicionais num molde para o fabricar [18]. As ferramentas utilizam pastilhas acopladas ao corpo de metal da broca, substituindo as arestas de corte no fim do corpo (Figura 8) [4]. Podem ser utilizadas numa

grande variedade de materiais devido à facilidade na mudança da pastilha, podendo utilizar várias geometrias [19].

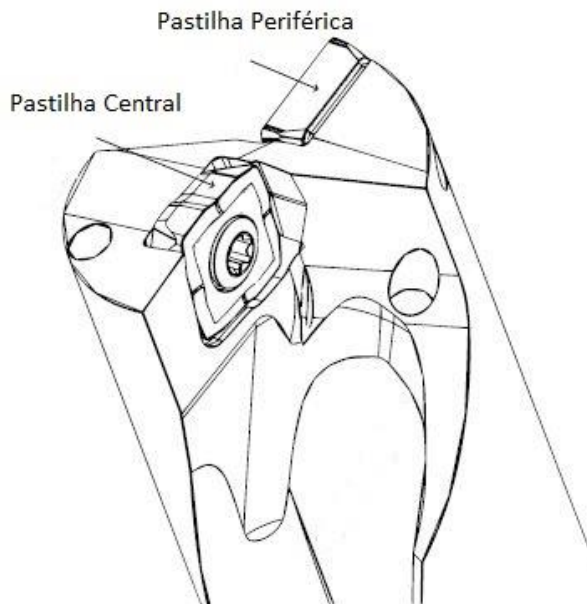


Figura 8: Exemplar da extremidade de uma broca com pastilhas intercambiáveis [20] (adapt.)

Devido à troca das pastilhas, a economia da maquinação é melhorada. As pastilhas são feitas de metal duro, que em comparação com o corpo da broca, pode suportar condições de corte mais severas. Em vários casos, a pastilha pode ser rodada por possuir várias arestas de corte. É possível utilizar o corpo da broca durante mais tempo, pois é apenas a pastilha que está em contacto com o material a maquinar. Ao existir desgaste num lado da pastilha, basta rodá-la e, por consequente, trocá-la após o desgaste existir em todas as faces [20].

Esta configuração oferece diversas vantagens durante a maquinação. A elevada taxa de remoção de material e a desnecessidade de realizar um furo guia acrescentam um aumento de produtividade [4] [19].

A refrigeração interna apresenta um contributo no processo de furação. O refrigerante atravessa o corpo da broca através de furos, emergindo na extremidade final perto das arestas cortantes. Devido à alta pressão, o fluído ajuda a extrair as aparas para fora da área de trabalho, evitando dano nas pastilhas ou nas paredes do furo [21]. Sumariando, existem três grandes vantagens ao utilizar pastilhas para furação [22]:

- Aumento de produtividade;
- Custos de produção mais reduzidos;
- Melhor versatilidade, podendo uma única ferramenta realizar mais operações além da furação simples.

Contudo, o uso desta configuração tem algumas limitações. O diâmetro mínimo do furo a ser produzido comercialmente disponível é de 10 mm tendo uma profundidade máxima limitada ao diâmetro. Para além disso, a precisão do furo é sempre muito difícil de controlar (Tabela 1). Brocas com pastilhas indexáveis requerem menor força de avanço, sendo muito superior na broca inteiraça. Porém, necessitam de maior potência despendida pela máquina ferramenta devido ao aumento da remoção de material, levando à necessidade de máquinas rígidas e em boas condições de manutenção [22].

Tabela 1: Variação do diâmetro do furo com a utilização de diferentes tipos de brocas [22] (adapt.).

Diâmetro da broca (mm)	Inteiraça de metal duro	Pastilhas intercambiáveis	Ponta de metal duro soldada (L/D < 3)	Ponta de metal duro soldada (L/D < 5)	Ponta substituível
< 10			+0,035	+0,055	
< 17	+0,030	+0,10	+0,042	+0,070	
< 25	+0,040	+0,15	+0,050	+0,080	0,40

É possível furar uma alargada variedade de materiais, mas não é aconselhado a materiais arrançados em camadas. Ao perfurar uma camada, é disparado um disco a enorme pressão contra a camada seguinte [22]. Este disco forma-se devido a um ângulo da pastilha central, criando uma zona “morta” no centro do furo que apenas seria removida com o avanço da broca (Figura 9).

O sistema mais simples é composto pela broca de aço e duas pastilhas de metal duro (uma central e outra periférica) com arestas de corte e geometrias complexas. Dependendo do diâmetro da

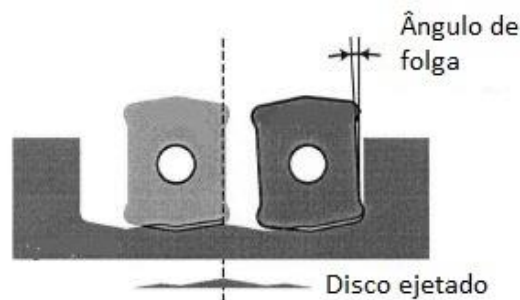


Figura 9: Posição das pastilhas durante o corte [23] (adapt.)

broca, mais pastilhas são adicionadas, sempre aos pares. Cada pastilha corta uma zona diferente do furo, originando um padrão no fundo deste [23].

Sendo um sistema assimétrico, recorre-se a um ângulo de balanceamento para anular as forças radiais (Figura 10). Se estas não forem anuladas, existem vibrações, criando um furo oval (Figura 11) ou alargamento deste [23].

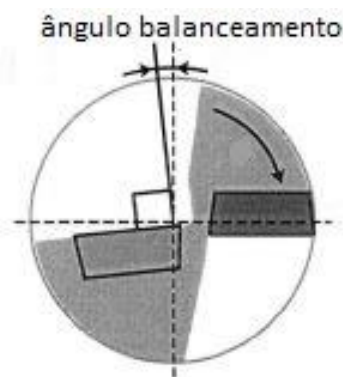


Figura 10: Vista de topo da broca demonstrando o ângulo de balanceamento [23] (adapt.)

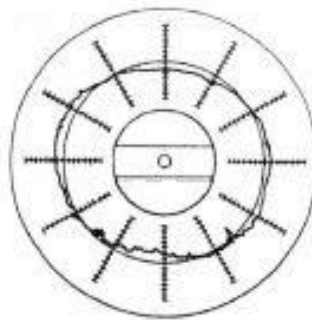


Figura 11: Furo oval criado devido à não anulação de forças radiais (vibrações) [23]

O corpo da broca de aço possui diâmetro inferior ao furo pretendido, tendo a aresta de corte da pastilha periférica a responsabilidade de perfazer o diâmetro exigido [23]. O uso desta configuração limita o avanço por rotação f_z a metade da broca inteira. Com cada pastilha a percorrer zonas diferentes do furo, sendo necessário dar uma rotação completa, ao contrário de brocas inteiriças, que dariam meia rotação. Contudo, é conseguido elevadas velocidades de corte devido à dureza do material e revestimento das pastilhas, originando velocidade de avanço superiores. É

recomendado o uso de materiais diferentes nas duas pastilhas, sendo usual a central possuir um material com maior rigidez dado à falta de velocidade de corte no centro do furo [19].

Venkatesh et al [17], comparando uma broca nova na altura (com pastilhas intercambiáveis) com uma convencional, observaram que a força de avanço e a força binária eram inferiores, devido à inexistência da ponta da broca. Comparou a qualidade superficial do furo, tendo conseguido obter valores de $R_a = 1 \mu m$, valor que apenas com recurso a mandrilagem era conseguido.

Wang et al [24] tentaram melhorar o desempenho da furação com pastilhas intercambiáveis no acabamento superficial ao fazer modificações nas brocas (com introdução de quebra-aparas, ângulo da aresta de corte κ_r de 20° e alívio da face de folga). Conseguiram uma redução das vibrações e melhoramento do acabamento da superfície com as suas alterações.

2.2.1. Apra formada na furação com pastilhas indexáveis

Venkatesh et al [15] utilizaram equipamentos de paragem rápida com uma aceleração muito elevada ($2,3 \cdot 10^6 m/s^2$), conseguindo observar a apra ainda ligada no material a maquinar. Utilizaram o aço AISI 1018 como material de ensaio e repararam na existência de apra aderente dado pela pastilha periférica. Utilizaram duas brocas com diferentes geometrias da pastilha, analisando numa delas a influência do revestimento (sem revestimento, PVD e CVD) (Figura 12). As formas das aparas obtidas encontram-se na Figura 13. A configuração A, formou aparas mais elásticas, tendo a configuração B formado aparas mais frágeis, que quebravam com facilidade e originavam leves reentrâncias na superfície do furo. Através das imagens fornecidas da raiz da apra, verificou que a apra aderente na configuração A era mais reduzida.

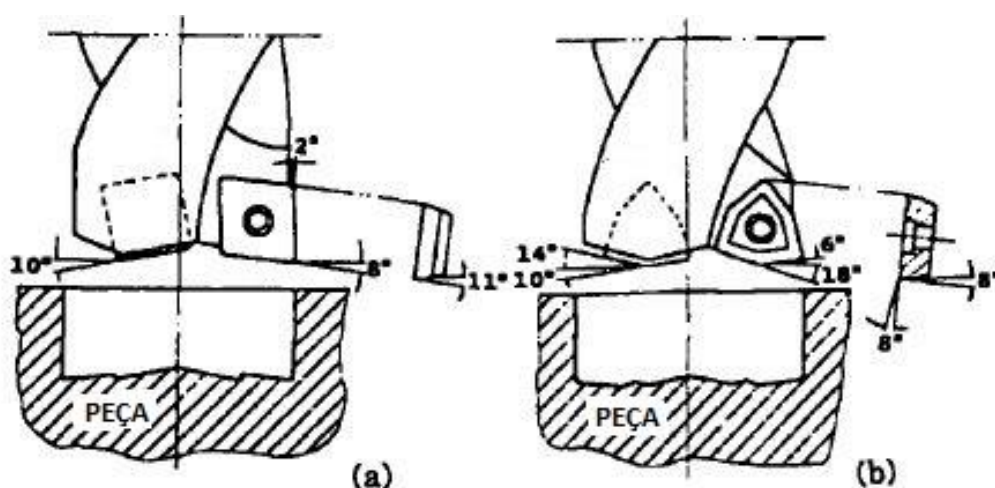


Figura 12: Tipos de pastilhas utilizados na experiência: a) ferramenta possuiu pastilha central quadrada e periférica em losango, b) ferramenta possuiu pastilha em forma *Trigon* (PVD, CVD e sem revestimento) [15] (adapt.)

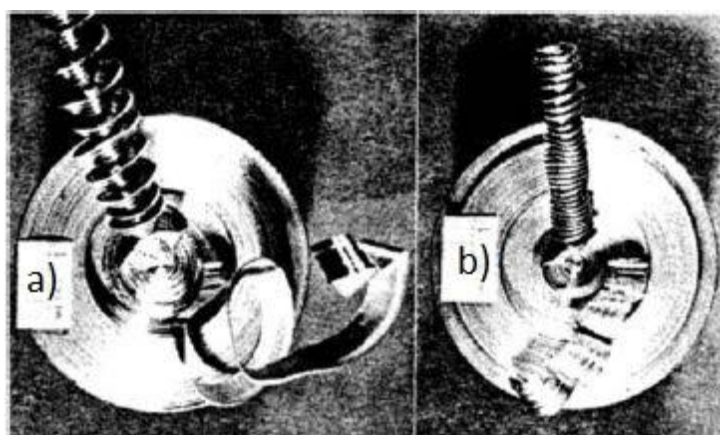


Figura 13: Forma da apara com paragem explosiva da rotação da ferramenta: a) ferramenta A, b) ferramenta B [15] (adapt.).

A apara aderente forma-se devido ao atrito entre a face de ataque e a apara. É comum o seu aparecimento em velocidades de corte reduzidas e esta vai crescendo até ser removida. Formam-se picos de força de maquinação exercidos durante o corte, sendo máxima quando a apara aderente possui maior espessura, e mínima quando esta é removida [25].

Este tipo de apara é recorrente em temperaturas de corte reduzidas. A interferência do fluído refrigerante presente na aresta de corte arrefece os componentes, originando maior apara aderente [26]. Dado ao ciclo da formação da apara aderente, a furação é instável, originando piores acabamentos. Porém, esta apara prolonga o tempo de vida da ferramenta [25].

2.2.2. Vibrações

Reside no controlo das vibrações a maior dificuldade para os fabricantes de brocas com pastilhas intercambiáveis. O comprimento das arestas de corte efetivas da pastilha central e periférica não é idêntico, resultando assim na assimetria da ferramenta e um ligeiro desequilíbrio das forças radiais. Com a inexistência da ponta da broca e a falta de margens, a broca não possui um ponto de apoio durante a furação, contando apenas com a inércia do corpo da broca. Com este desequilíbrio existe uma tendência a aparecer folga no diâmetro do furo [27]. Rahmam et al [17] evidenciam estes pormenores com experiências comparando o desempenho de brocas inteiriças e brocas indexáveis. Para Roukema [23], o entendimento da origem da vibração da broca permite um melhoramento na precisão e velocidade de operações de furação.

Existem três tipos de vibração durante a furação: axial, torsional e lateral. Vibrações laterais relacionam-se com a furação longa, envolvendo-se com a frequência natural da broca quando presa num ponto e forçada com uma força de avanço (sem existir rotação da broca). Vibração axial e torsional derivam de rápidas variações das forças de avanço e binário. São suscitadas quando a aresta de corte recalca a camada de material a maquinar, existindo um aumento substancial da velocidade instantânea com a broca a voltar depois à posição não deformada [23].

Parsian [20] executou um estudo de forma a entender os mecanismos causadores de vibrações estruturais e níveis de ruído inaceitáveis com brocas de pastilhas indexáveis, criando um modelo de simulação com foco em furação de aço. Cada segmento infinitesimal na aresta de corte segue um caminho helicoidal devido ao movimento axial e angular em simultâneo, deixando uma superfície ondulada. Na segunda passagem do corte, outra superfície ondulada é deixada, que poderá não estar em fase com a anterior devido às vibrações existentes (Figura 14), piorando o acabamento do furo.

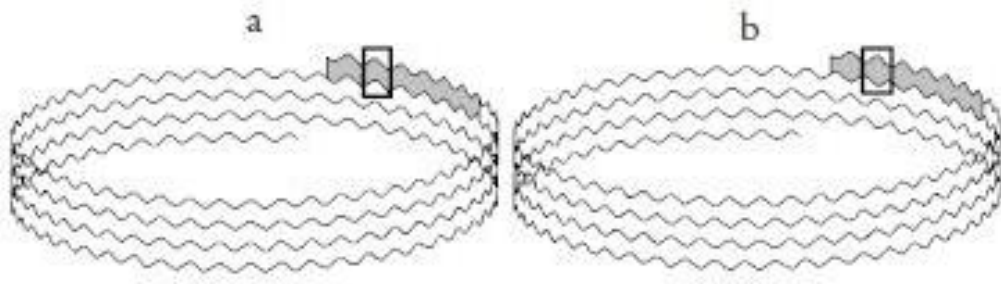


Figura 14: Superfície onduladas helicoidais: a) Ondas em fase, b) Ondas desfasadas [20]

Wang et al [24] com as alterações às pastilhas intercambiáveis, conseguiram uma melhor resistência às vibrações (Figura 15), conseguindo medir com recurso a um acelerómetro. Notaram que o desvio em diâmetro se reduziu 40% das ferramentas originais.

Fujii et al [28] corroboraram o estudo de Wang, afirmando que a superfície de folga tende a colidir com a parede do furo num determinado tempo durante um ciclo de rotação, induzindo vibração lateral.

Tekinalp et al [29] estudaram a interferência da velocidade da rotação da ferramenta e o ângulo das hélices com brocas inteiriças nas vibrações causadas. A rotação do fuso tem relação direta com a estabilidade da broca, mas não interfere significativamente com brocas de tamanho reduzido.

Brocas com hélices não curvas apresentam menor deflexão do corpo, metade de brocas com hélices helicoidais, mas se torna desprezável após a fase inicial do furo.

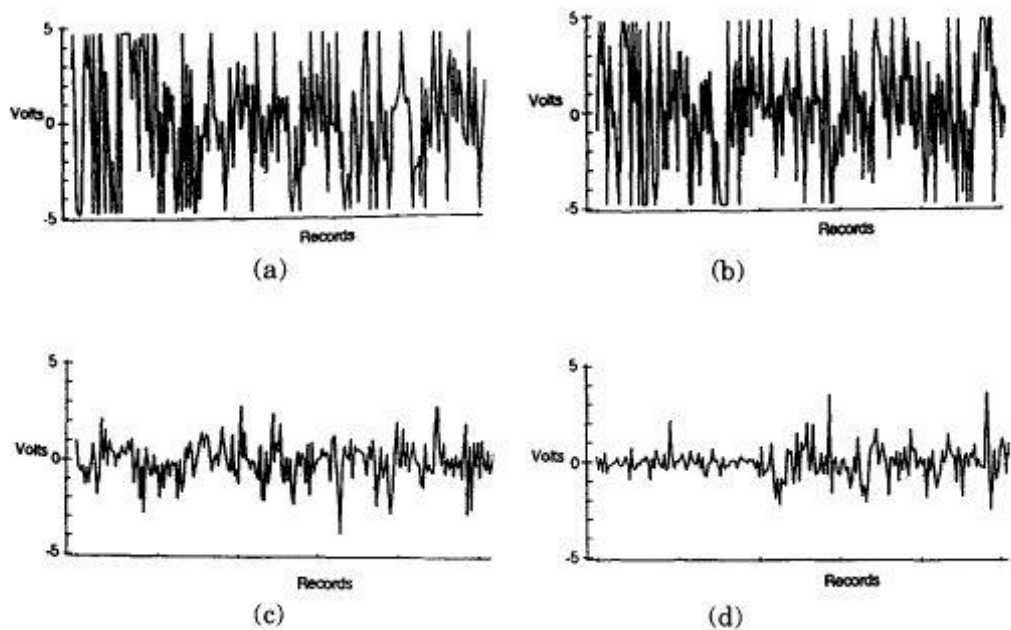


Figura 15: Análise de vibrações com alterações de Wang: a) vibração segundo eixo z da ferramenta não modificada, b) vibração segundo eixo x da ferramenta não modificada, c) vibração segundo eixo z da ferramenta modificada, d) vibração segundo eixo x da ferramenta modificada [24].

2.3. Integridade superficial

Uma superfície pode ser descrita como a camada mais periférica de uma entidade, sendo a interface a camada entre duas entidades que diferem física ou quimicamente. É detetada sempre uma superfície em todo o sistema que tenha presente uma súbita mudança de propriedades tais como estrutura cristalina ou densidade [30].

Durante processos de maquinação, uma nova superfície é deixada após cada corte feito pela aresta da ferramenta. Muitas peças são maquinadas para possuírem dimensões rigorosas e bons acabamentos, afim de alojar rolamentos ou outras aplicações. Tais aspetos limitam o leque de ferramentas possíveis, geometria e a quantidade de remoção de material [19].

Whitehouse [31] enumera três irregularidades para a diferença entre superficial nominal e real (Figura 16):

- Rugosidade proveniente de processos de fabrico, tais como as marcas deixadas pela ferramenta de corte durante a maquinação;
- Ondulação com origem em maquinação imprópria. Tem-se como exemplo as vibrações das ferramentas;
- Ondas muito longas resultadas de erros de deslizamento de membros rotativos da maquinação ou distorção térmica.

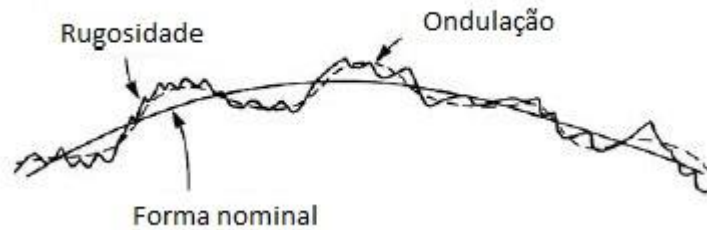


Figura 16 Superfície real e nominal [31] (adapt.)

O método mais comum de determinar a qualidade do acabamento da superfície é realizar um corte 2D através da superfície. A ondulação obtida demonstra a amplitude e comprimento de onda da linha. Nestes estudos, é utilizado apenas uma porção da superfície, representando um todo [32].

Existem diversos métodos com intenção de avaliar a qualidade da superfície, como microscópios eletrónicos de varrimento ou aparelhos de dispersão de luz, mas os mais comuns e utilizados são os aparelhos de contacto. A Figura 17 demonstra uma imagem recolhida por microscópio [32].

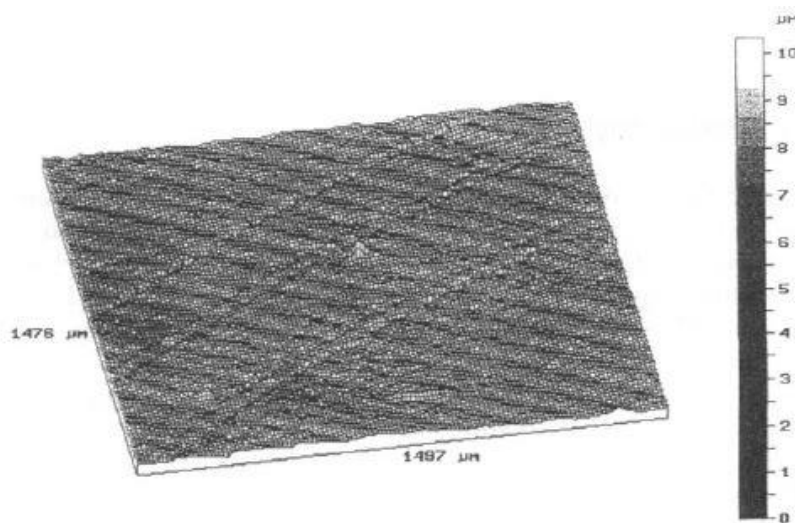


Figura 17: Imagem recolhida por microscópio analisando amplitudes [32]

Com intuito de poderem ser comparadas várias superfícies, foram criadas normas com parâmetros de medição (as normas criadas por Taylor Hobson Ltd. (THL) e ISO 4287, 1997 contêm grande parte destes), sendo os mais usuais os parâmetros de amplitude e distribuição de amplitude [33].

Venkatesh et al [27] estudaram a superfície da parede do furo comparando formas geométricas de pastilhas intercambiáveis em furação, reparando que a ferramenta com pastilha central quadrada e periférica em forma de losango, com revestimento PVD, conseguia um melhor acabamento comparando com a ferramenta com pastilhas em forma *trigon* (PVD, CVD e sem revestimento).

Okada et al [34] realizaram experiências em materiais de difícil maquinação com brocas de pastilhas intercambiáveis e brocas inteiriças, tendo como um dos critérios de comparação a qualidade da superfície do furo. Repararam que o acabamento era semelhante entre os dois tipos de brocas.

Wang et al [24] com as alterações feitas às pastilhas intercambiáveis, conseguiram reduzir a rugosidade da parede do furo. Nieslony et al [35] executaram um estudo experimental em placas de titânio e aço com duas brocas de pastilhas intercambiáveis (mantendo a geometria quadrada, mas alterando o revestimento). Uma das ferramentas produziu melhor acabamento no titânio e a outra no aço, remetendo à interferência do revestimento da pastilha. É conseguido um melhor acabamento com a redução do binário durante a furação.

Okada et al [36] apresentaram um estudo comparando uma broca inteiriça e uma de pastilhas intercambiáveis na furação de aços ligados com utilização de MQL (quantidade de lubrificação mínima). Não obteve resultados favoráveis à broca de pastilhas.

2.3.1. Geometria da aresta alisadora

Com a necessidade do melhoramento de processos de acabamento das superfícies, surgiu a geometria da aresta alisadora AA (*Wiper*). Esta configuração da aresta de corte conta com a redução/anulação do ângulo de folga da aresta de corte, sendo que o propósito desta geometria é, efetivamente, eliminar as marcas do avanço da ferramenta causadas na superfície maquinada [12].

Esta ideia tem sido aplicada em operações de fresagem e torneamento, sendo que a geometria *Wiper* utiliza uma aresta de arrasto posterior ao raio de ponta (Figura 18) [3]. Apesar desta geometria ter sido criada com intuito de melhores acabamentos (entidade *Sandvik* deu o nome de *Wiper* a esta configuração tendo sido pioneira da sua evolução em processos de torneamento), a

indústria utiliza-a para aumento de produção [37]. Com o aumento do avanço, chegando a atingir o dobro, esta geometria consegue alcançar o mesmo nível de acabamentos que uma pastilha *standart*, em metade do tempo (Figura 19) [38].

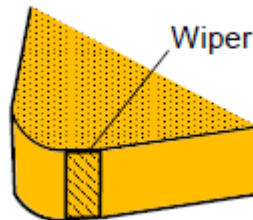


Figura 18: Geometria *Wiper* [3]

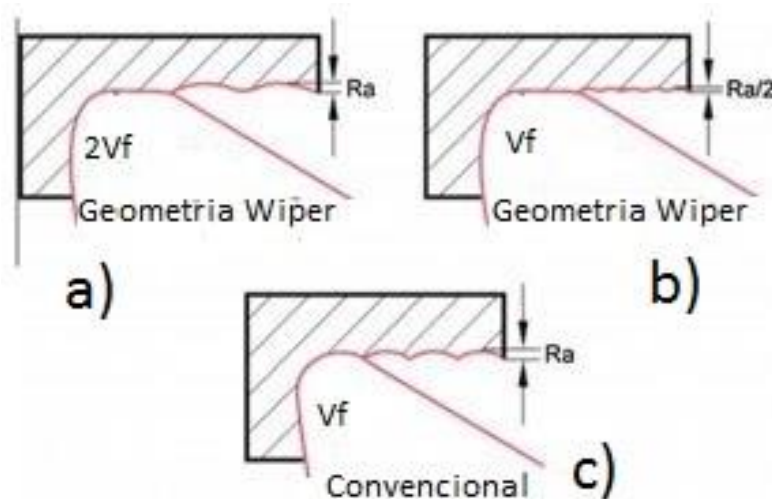


Figura 19: Análise de rugosidade de geometria *Wiper* vs Convencional: a) *Wiper* com $2V_f$, b) *Wiper* com V_f , c) convencional com V_f [38] (adapt.).

Dado à distribuição de forças pela aresta de corte (ao não se concentrarem no raio de ponta), o tempo de vida chega a ser 20% superior às pastilhas *standart* [37]. Na Figura 20 observa-se um exemplo do desgaste na face de ataque de pastilhas convencional e *Wiper* [39].

O uso desta geometria trás algumas limitações [3]:

- Necessidade da alta precisão da sua manufatura, necessitando que a aresta alisadora fique paralela (ou quase, nunca excedendo os 0°) ao sentido do avanço;
- É apenas rentável com níveis de avanço de forma a utilizar toda a aresta de corte;

- A máquina-ferramenta precisa de ser estática e dinamicamente rígidas.

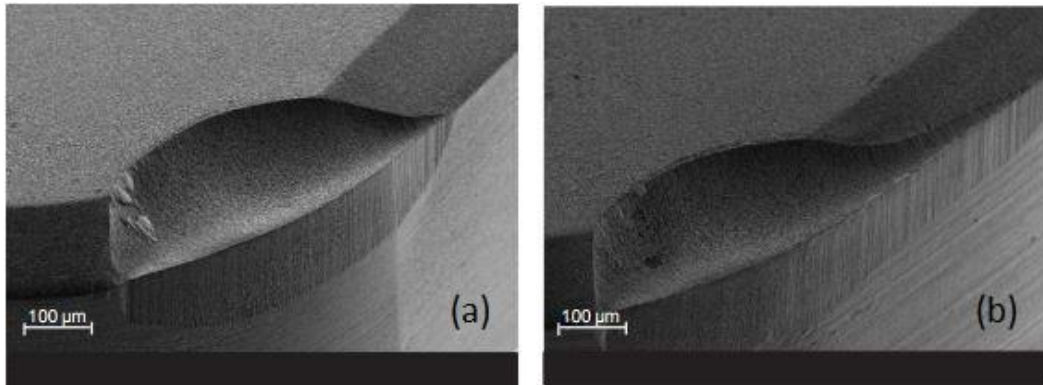


Figura 20: Desgaste de pastilha: a) convencional, b) *Wiper* [39]

Com as potencialidades dadas por esta configuração, foram inúmeros os estudos efetuados em processos de torneamento. Karpat et al [40] fizeram um estudo comparativo entre geometria *Wiper* e convencional em torneamento de aço AISI D2, analisando a qualidade superficial, desgaste da pastilha e forças de corte, conseguindo resultados satisfatórios, sobretudo na qualidade superficial.

Özel et al [40] completaram o estudo desta configuração em torneamento de aço AISI D2 com pastilhas cerâmicas e variando as condições de corte, tentando obter as condições ideais para a utilização. Com um menor avanço e uma maior velocidade de corte obtém-se um melhor acabamento.

Kurniawan et al [41] realizaram estudos experimentais em aço inoxidável com pastilhas *Wiper*, estudando o tempo de vida e integridade superficial. Esta geometria aumentou o tempo de vida da ferramenta. Liu et al [42] realizaram estudos experimentais comparativos entre geometria convencional e *Wiper*, no torneamento de aços endurecidos com pastilhas revestidas, conseguindo duas vezes melhor acabamento com o mesmo avanço e o mesmo acabamento com duas vezes a velocidade de avanço.

Grzesik et al [43] focaram-se no desgaste da pastilha mista de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiC}$ no torneamento de aço de alta rigidez. Repararam que existiam dois tipos de desgaste na face de ataque, concentrando-se na ponta da pastilha e o outro disperso ao longo da aresta alisadora. De acordo com o estudo, foi prolongado o tempo de vida da ferramenta.

Guddat et al [39], estudaram a integridade superficial de AISI 52100, usando pastilhas PCBN com geometria *Wiper*. Com o uso da configuração, foram conseguidas superfícies menos rugosas com tensões residuais compressivas altas, comparando com configuração convencional. Isto deve-se às forças de corte serem superiores, induzindo temperaturas mais elevadas. Esta junção leva a maiores tensões residuais compressivas. A utilização da geometria *Wiper* consegue melhor integridade superficial, tendo ao mesmo tempo uma maior produtividade. A velocidade de corte não teve influência.

Grzesik et al [44] realizaram um estudo comparativo entre pastilhas *Wiper* e convencional cerâmicas em torneamento de aços com baixo teor de carbono, tendo a pastilha *Wiper* o dobro do avanço para o mesmo acabamento superficial comparando à convencional.

2.4. Introdução ao projeto realizado

Com a inexistência de estudos avaliativos da geometria *Wiper* para operações de furação, este documento é pioneiro neste tema. É sentida a necessidade de melhorar a qualidade superficial da parede de furos, como o aumento da produtividade. Com a inclusão da AA, é esperado que o objetivo seja cumprido. São realizados ensaios experimentais com a recolha de critérios comparativos que possam corroborar a premissa.

Pretende-se fabricar uma ferramenta com pastilhas intercambiáveis incorporadas com a geometria *Wiper* e fazer a comparação com a ferramenta inalterada.

3. Procedimento experimental

Neste capítulo é referido todo o trabalho prático realizado no intuito de concretizar os objetivos propostos. Como já foi previamente referido, numa etapa inicial foram realizados vários ensaios em aço AISI 4337, analisando o comportamento de três ferramentas distintas, com as respetivas pastilhas intercambiáveis. Foram definidas as condições de corte CC e procedeu-se aos ensaios, tendo como avaliação a comparação de aspetos importantes na furação entre as ferramentas:

- Formação e controlo de apara;
- Potência despendida pela máquina ferramenta;
- Controlo de vibrações;
- Acabamento da superfície do furo.

Estes aspetos são analisados através de parâmetros comparativos. A formação e controlo da apara foi avaliada com a recolha de aparas e análise à forma destas. A potência foi avaliada pela potência que a máquina utilizou para realizar o movimento rotativo da ferramenta durante o corte. O controlo de vibrações foi avaliado pela precisão dimensional do diâmetro do furo, sendo a qualidade do acabamento da superfície do furo avaliada pela rugosidade média aritmética. Com base nos resultados obtidos (capítulo 4), uma ferramenta foi escolhida para ser incorporada com a AA. Realizou-se o levantamento da forma geométrica da pastilha e do corpo da broca, sendo modelados num software CAD e fabricados.

Novos ensaios de furação foram realizados para esta nova ferramenta. Ensaios com as mesmas CC que os iniciais, de forma a que fatores adjacentes aos controlados sejam minimizados. Após este procedimento, os parâmetros comparativos foram analisados e discutido a inclusão da AA num processo de furação com estas características.

3.1. Ferramentas utilizadas

Todas as ferramentas utilizadas foram fornecidas pela Palbit. Estas ferramentas são brocas com pastilhas intercambiáveis com refrigeração interna e projetadas para corte de aços ligados. Estas possuem características presentes na Tabela 2.

Tabela 2: Características das ferramentas fornecidas

	Ferramenta 1	Ferramenta 2	Ferramenta 3
Tipo de ferramenta	Broca com pastilhas intercambiáveis	Broca com pastilhas intercambiáveis	Broca com pastilhas intercambiáveis
Relação Comp./Diâmetro	3*D	3*D	3*D
Diâmetro do furo	24 mm	24 mm	24 mm
Material a maquinar	Aços ligados	Aços ligados	Aços ligados
Raio de ponta	0,8 mm	0,8 mm	0,8 mm
Material da pastilha	Metal duro	Metal duro	Metal duro
Revestimento da pastilha	PVD	PVD	PVD
Material do corpo da broca	Aço	Aço	Aço
Quebra-aparas	Sim	Sim, variando com aresta de corte	Sim
Igualdade entre pastilha central e periférica	Sim	Sim	Não
Número de lados de corte de cada pastilha	4	4	4
Estilo de geometria da pastilha	Quadrada	Complexa	Central complexa; Periférica quadrada

3.1.1. Ferramenta 1

Eleita padrão pela Palbit. Esta é utilizada como base de comparação para todas as brocas com quatro arestas de corte por pastilha para aços ligados produzidas na empresa. Tem a sua geometria de contorno quadrada, com quebra-aparas regular (igual em toda a aresta de corte) (Figura 21). Utiliza pastilha única para alojamento periférico e central.



Figura 21: Pastilha e ponta da broca da ferramenta 1 (cortesia da Palbit)

3.1.2. Ferramenta 2

Elegida como potencial candidata a que possa ser incorporada com AA. Pastilha com geometria da aresta de corte complexa, visível na Figura 22. O seu quebra-aparas varia com a aresta de corte, sendo mais acentuado na área mais próxima do raio de ponta. Esta geometria específica do quebra-aparas tem como principal função o enrolamento da apara, e não a própria quebra da apara. Utiliza pastilha única para alojamento periférico e central.

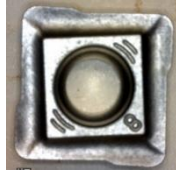


Figura 22: Pastilha central/periférica da ferramenta 2 (cortesia da Palbit)

3.1.3. Ferramenta 3

À semelhança da ferramenta 2, esta pastilha também é candidata a que seja incorporada a AA. Esta ferramenta utiliza duas pastilhas diferentes, uma periférica e outra central. A geometria da pastilha periférica é semelhante à pastilha da ferramenta 1, quadrada com quebra-aparas regular (Figura 23). A central possui uma geometria da aresta de corte complexa (Figura 24).



Figura 23: Pastilha periférica da ferramenta 3 (cortesia da Palbit)



Figura 24: Pastilha central da ferramenta 3 (cortesia da Palbit)

3.2. Ensaios iniciais

O objetivo destes ensaios iniciais é observar o comportamento das três ferramentas tendo em conta o estudo bibliográfico. Após a realização destes, é feito uma recolha de resultados e a escolha de qual a ferramenta para ser incorporada com a AA. Todos os ensaios de furação foram realizados na mesma máquina-ferramenta: MCV 1270 POWER (Figura 25) [45], encontrando-se na Tabela 3 um resumo das especificações.

Tabela 3: Especificações da máquina-ferramenta utilizada

Alcance trabalho		
Eixo x	1270	mm
Eixo y	610	mm
Eixo z	720	mm
Distância desde nariz do spindle até mesa de trabalho	120-840	mm
Mesa		
Peso máximo na mesa	1200	kg
Fuso		
Afunilo do fuso	ISO 50	
Velocidade máxima	8000	rot/min
Avanço		
Avanço de trabalho	1 – 40 000	mm/min
Armazém de ferramentas		
Comprimento máximo ferramenta	400	mm
Diâmetro máximo ferramenta	125	mm
Peso máximo ferramenta	15	kg
Motor		
Output fuso (potência)	28/43	kW
Torque nominal	406/623	Nm
Pressão Ar	0,55-0,6	MPa



Figura 25: Máquina-ferramenta utilizada em todos os ensaios realizados (cortesia da Palbit).

3.2.1. Condições de corte

No intuito de poder avaliar os critérios de comparação foi necessário definir uma gama de condições de corte CC para os ensaios de furação (Tabela 4).

. A máquina-ferramenta para realizar um ensaio (furo) precisa de 2 parâmetros:

- Velocidade rotação do fuso n [rpm];
- Velocidade de avanço V_f [mm/min].

Estes valores são obtidos através das equações (1) e (2) (Capítulo 2), sendo o diâmetro do furo 24 mm. O esquema da parametrização encontra-se na Figura 26. É necessário determinar os valores da velocidade de corte V_c [m/min] e do avanço por rotação f_z [mm/rot]. Estes foram fornecidos pela Palbit como sendo usuais para testes de furação em aços ligados com pastilhas indexáveis. Definiram-se as velocidades de corte de 120, 160 e 200 [m/min], com avanços por rotação de 0,06, 0,08, 0,1 e 0,12 [mm/rot]. Esta gama de valores é suficientemente alargada para que os utilizadores possam utilizar a ferramenta projetada. Contabilizam-se 12 ensaios para cada ferramenta, perfazendo um total de 36 furos.

Tabela 4: Condições de corte dos ensaios decorridos. Interliga 3 velocidades de corte com 4 avanços por rotação distintos

		V_c [m/min]		
		120	160	200
f_z [mm/rot]	n [rpm]	1592	2122	3653
0,06	V_f [mm/min]	95,5	127,3	159,2
0,08		127,3	169,8	212,2
0,1		159,2	212,2	265,3
0,12		191,0	254,6	318,3

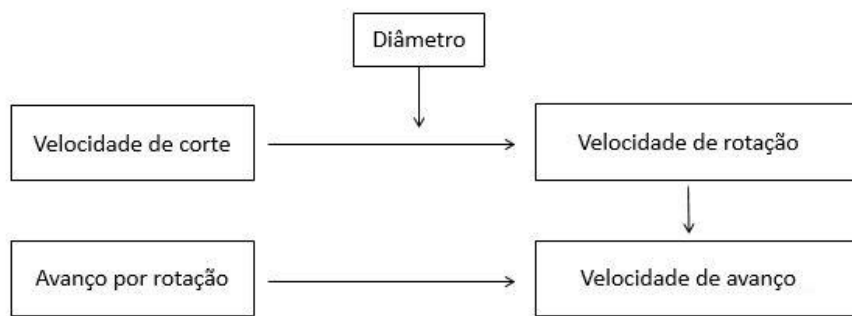


Figura 26: Esquema de obtenção das condições de corte a fornecer à máquina-ferramenta.

3.2.2. Realização dos ensaios

Os ensaios de furação podem ser divididos em três etapas:

- Preparação dos ensaios;
- Realização dos ensaios;
- Pós ensaios.

Na preparação do ensaio (Figura 27), o bloco de aço AISI 4337 foi fornecido pela Palbit e preparado para a realização de furos. O material de trabalho é um cilindro com facejamento no topo e na base. Além disso, foi realizado um facejamento lateral de forma a obter duas faces planas e paralelas, que foram apertadas numa prensa, impossibilitando movimento.

De seguida, elaborou-se um programa CAM com simulação dos furos, tendo sido exportado posteriormente na linguagem da máquina-ferramenta. A linguagem intrínseca à máquina-ferramenta é a *Heidenhain*. Todos os furos são uma furação direta (sem intervalos), com 40 mm de profundidade e com refrigeração interna.

Colocou-se o bloco de ensaios na mesa de trabalho e foi feito o aperto. O bloco foi zerado utilizando uma ferramenta calibre, tendo sido colocado o ponto de referência da peça no eixo do cilindro, na face de topo. É, então, acoplada a ferramenta no fuso da máquina e efetuado uma medição em altura e raio da ferramenta para serem feitas as compensações.



(a)

```

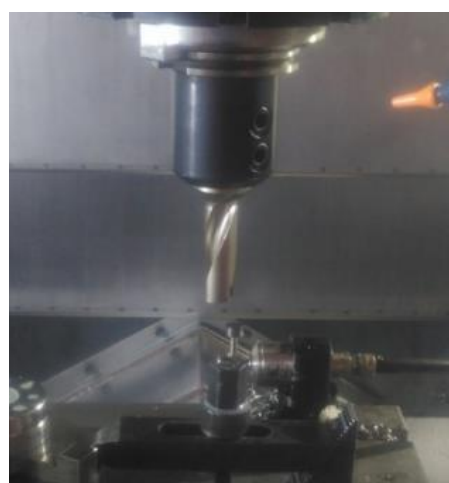
6 ;
7 M9
8 L Z+0 R0 FMAX M91
9 M5
10 TOOL CALL 15 Z S1591
11 M3
12 L X-56 Y+0 R0 FMAX
13 L Z+20 R0 FMAX
14 M7
15 L Z+10 FMAX
16 CYCL DEF 1.0 PECKING
17 CYCL DEF 1.1 SET UP +10
18 CYCL DEF 1.2 DEPTH -40
19 CYCL DEF 1.3 PECKG +40
20 CYCL DEF 1.4 DWELL 0
21 CYCL DEF 1.5 F191
22 L FMAX M99
23 L Z+20 FMAX
24 M5
25 L Z+0 R0 FMAX M91
26 M30

```

(b)



(c)



(d)

Figura 27: Preparação dos ensaios: a) material de trabalho devidamente preparado e apertado, b) exemplo do código imposto à máquina ferramenta, c) definição do ponto de referência da peça, d) obtenção da altura e raio da ferramenta (cortesia da Palbit).

Na realização dos ensaios foi adotado um sistema prático e sistemático:

- Antes de realizar qualquer furo, é necessário limpar as aparas da área de trabalho de forma a não existir contaminação. Sendo recolhido sempre as aparas de cada ensaio é imperativo não correr o risco de fazer recolha de ensaios anteriores;
- Realizar o furo em questão. Apenas um furo pode ser efetuado em cada ensaio.
- Durante o furo, observar a potência despendida pelo fuso da máquina-ferramenta. Antes da broca perfurar o material, já se encontra com a velocidade de rotação necessária, tendo já uma percentagem de potência para a rotação. Quando penetra

no material, a potência é mais elevada, sendo que essa diferença é registada (Figura 28). Esta informação é dada pela própria máquina-ferramenta;

- Após furo realizado, recolher as aparas. Sendo que a apara central é diferente da periférica, são sempre recolhidas, pelo menos, dois tipos de apara. Estas são catalogadas e guardadas num recipiente próprio (Figura 29);
- Verificar se as pastilhas não apresentam falhas, como, por exemplo, fendas na aresta de corte.
- Marcar o furo;
- Repetir o ensaio desde o primeiro ponto, variando as CC.



Figura 28: Visualização da potência despendida pela máquina-ferramenta (cortesia da Palbit).



Figura 29: Armazenamento das aparas recolhidas de cada ensaio realizado.

3.2.3. Recolha dos parâmetros de comparação

Após todos os furos das três ferramentas realizados, prosseguiu-se para a recolha dos restantes parâmetros de comparação. A forma da apara e a potência despendida pela máquina-ferramenta foram recolhidos durante o ensaio.

Para determinar o diâmetro do furo foi utilizado um micrómetro de interiores (precisão 0,0005 mm) (Figura 30). Executaram-se 3 medições para cada furo, variando a profundidade da medição, fazendo posteriormente uma média simples. Quanto ao acabamento superficial, foi utilizado um rugosímetro na obtenção da rugosidade média aritmética Ra. Igualmente, foram executadas 3 medições, variando na profundidade do furo, estando limitado ao comprimento da ponteira. O aparelho utilizado foi TESA-rugosurf 10G (precisão de 1 μm) (Figura 31). Foi utilizado um *cut-off* de 0,8 mm com amostra efetiva de 4 mm.



Figura 30: Medição do diâmetro do furo com Micrómetro de furos (cortesia da Palbit)



Figura 31: Medição de rugosidade (Ra) com sistema de contacto (rugosímetro) (Cortesia da Palbit).

3.3. Levantamento da forma geométrica dos componentes

Sendo a ferramenta 2 a escolhida para ser incorporada com a AA, foi necessário fazer um levantamento da forma da pastilha e do corpo da broca de modo a poder ser modelada num software CAD. Importante informar que os valores obtidos não irão ser revelados devido a acordo confidencial com empresa.

3.3.1. Pastilha de corte

A pastilha de corte apresenta detalhes geométricos de grande rigor dimensional. Para recolher esses valores recorreu-se a aparelhos de elevada precisão, sendo que a maioria funciona através de sistemas de visão e tratamento de imagem. Estes aparelhos encontram-se todos nas instalações da Palbit. Na conceção do modelo CAD da pastilha é necessário determinar cotas mestre (Figura 32):

- Diâmetro do círculo circunscrito: círculo concêntrico com eixo da pastilha tangente às arestas de corte;
- Raio de ponta;
- Altura da aresta de corte em relação à base;

- Ângulo de folga;
- Geometria do quebra-aparas;
- Ângulo de ataque;
- Distância entre aresta de corte e face de topo da pastilha;
- Diâmetro do círculo externo: círculo concêntrico ao eixo da pastilha e tangente ao raio de ponta;
- Geometria do furo da pastilha;
- Faceta: pequena face plana na aresta de corte.

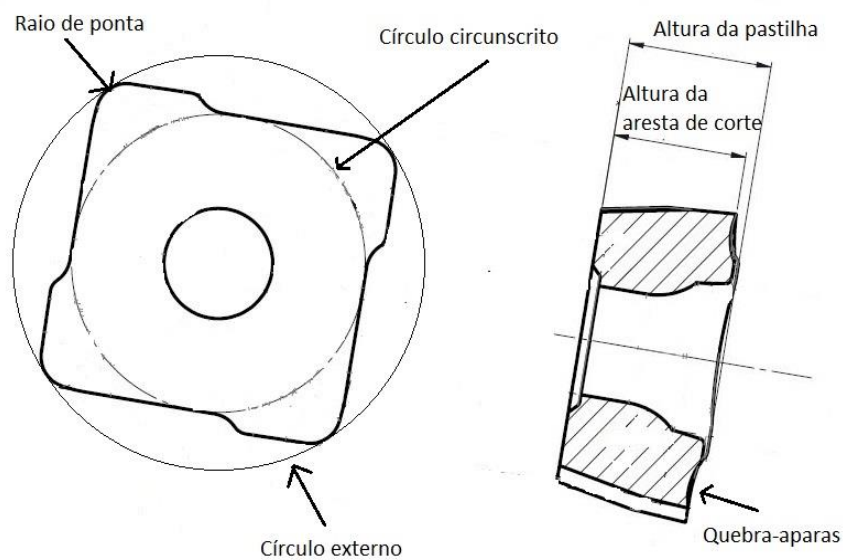


Figura 32: Esboço de uma pastilha representando algumas cotas e conceitos necessários para a sua modelação

3.3.2. Corpo da broca

É a broca que define o posicionamento da pastilha quando esta se encontra em posição para efetuar o corte, que indicia a importância de determinar as faces de encosto da pastilha. Isto leva à fixação da pastilha num espaço em três dimensões, sendo que o corpo da broca é modelado a partir da posição das pastilhas (aprofundado no capítulo 3.4). Para determinar estes planos foi utilizado uma máquina tridimensional ponto-a-ponto. Esta máquina é capaz de definir pontos, retas, planos e faces de sólidos (como superfície de um cilindro), exportando num formato digital passível de ser reconhecido pelo software CAD *Solidworks*. As superfícies registadas foram as seguintes:

- Planos de encosto lateral da pastilha;

- Plano de assentamento da base da pastilha;
- Plano de topo das pastilhas (com pastilhas acopladas na broca. Importante definir estes planos pois é fundamental para determinar ângulo de balanceamento);
- Superfície cilíndrica retificada da broca (veio);
- Plano de assentamento da broca no cone SK50;
- Ângulo das hélices (não foi definido pela máquina tridimensional, mas sim com recurso a um transferidor).

3.3.3. Aparelhos utilizados

Diversos aparelhos foram utilizados com propósito de obter cotas chave da pastilha e corpo da broca, entre outros pormenores:

- **Comparador de alturas** (Figura 33): é utilizado para medir cotas relativamente a um plano (neste caso, da base da pastilha). A ponteira é colocada no suporte de trabalho (com alguma pressão) e o contador é zerado. De seguida, coloca-se a pastilha no suporte e realiza-se medições. Foi utilizado para determinar altura da aresta de corte, altura total e a variação do quebra-aperas ao longo da aresta de corte. Conta com uma precisão de 0,005 mm.
- **Mitutoyo PJ-A3000 Vertical Profile** (Figura 34): O perfiloscópio é utilizado na obtenção de cotas/ângulos entre retas presentes num mesmo plano (tal como o círculo circunscrito). A base da estrutura é como um microscópio, auxiliado por controlos manuais para manusear a posição da mesa relativamente à lente, projetando a imagem num ecrã. Fornece cotas digitais, possuindo uma precisão de 0,001 mm. Tem um funcionamento parecido ao comparador de alturas, necessitando de zerar o contador quando uma das arestas está coincidente com o eixo. De seguida, desloca-se a mesa até à reta/ponto pretendido e averigua-se a cota.
- **Zoller venturion 450** (Figura 35): Equipamento utilizado para controlo de qualidade das pastilhas/ferramentas fabricados pela Palbit. É um aparelho que funciona a infravermelhos capaz de obter diversas cotagens das ferramentas apoiadas num suporte próprio. É possível determinar raios, ângulos, distâncias, entre outros. Foi utilizado no registo do raio de ponta e ângulos α_1 , α_2 e K_r , sendo também útil para observar o desnível entre as duas pastilhas acopladas na broca. Possui precisão de 0,001 mm.
- **Micro-Vu Vertex Multisensor Measuring Center** (Figura 36): Máquina que funciona com comando numérico e sistema de luzes. Através do contraste, é capaz de fornecer raios, ângulos, distâncias, pontos teóricos de interseção de retas, contornos de figuras

entre outros. Foi utilizada para determinar o contorno exterior da pastilha, raio de ponta, observar ausência de faceta na aresta de corte, ângulo de ataque, ângulo de saída e ângulo da base. Além disso, foi possível fazer um corte transversal na pastilha pelo seu eixo e perpendicular à base (com auxílio a uma retificadora) obtendo a geometria do quebra-
aparas e do furo interno. Possui uma precisão de 0,001 mm.

- **ZEISS DuraMax** (Figura 37): Máquina tridimensional ponto-a-ponto através de uma ponteira. Foram retirados os planos de assente de cada pastilha, superfície cilíndrica retificada do veio, plano da base retificada de assente no cone e ângulo de balanceamento definido pelos planos de topo das pastilhas, tendo sido exportado para o programa CAD. Possui precisão de 0,001 mm.



Figura 33: Comparador de alturas (cortesia da Palbit).

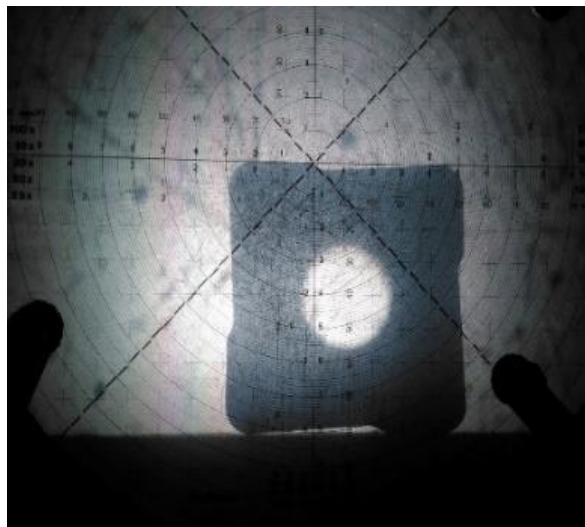


Figura 34 . Mitutoyo PJ-A3000 Vertical Profile (cortesia da Palbit)

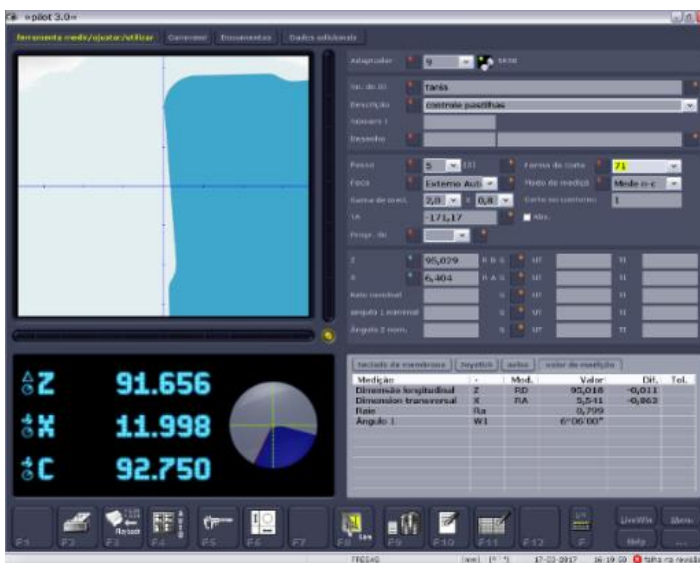


Figura 35: Zoller venturion 450 (cortesia da Palbit).

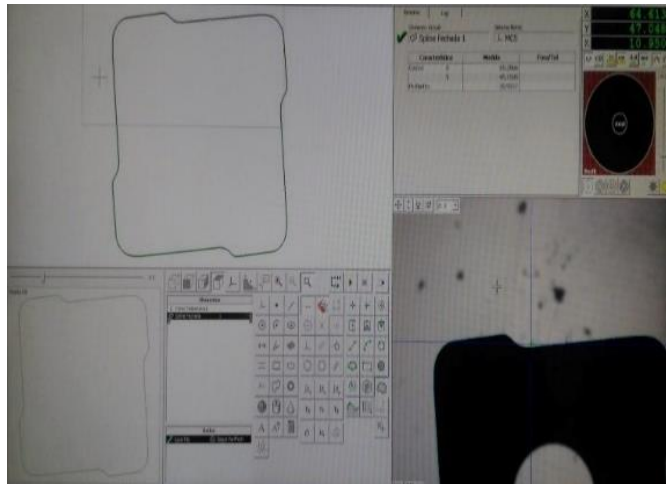
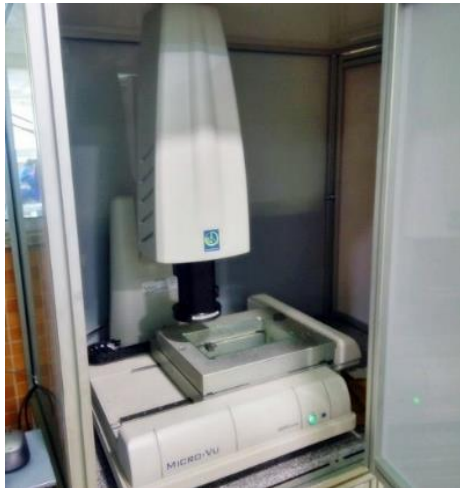


Figura 36: Micro-Vu Vertex Multisensor Measuring Center (cortesia da Palbit)



Figura 37: ZEISS DuraMax (cortesia da Palbit).

3.4. Modelação dos componentes

Após a obtenção de todas as cotas e relações entre planos dos dois componentes foi efetuado uma modelação dos componentes. Foi utilizado o *software Solidworks* para a conceção dos modelos. Os dois componentes foram modelados de forma sequencial, sendo que a pastilha de metal duro foi previamente elaborada, servindo de controlo para a modelação da broca num processo de montagem.

Não foi possível alternar entre os dois componentes, sendo que a broca só foi modelada após a geometria base da pastilha estar concluída.

A modelação da pastilha partiu de um *sketch* com o contorno exterior da aresta de corte e com a adição da AA. O perfil é extrudido e adicionado todos os pormenores previamente medidos. Foi elaborado o corte do furo interno destinado ao parafuso, um pequeno relevo no topo a marcar uma aresta de corte, a ausência da faceta e o quebra-aparas com inclusão de ranhuras servindo apenas como pormenores estéticos. Foram tidos cuidados excepcionais como a ausência de arestas vivas (apenas aresta de corte), o formato do topo (não sendo plano), o formato das paredes laterais, sendo impossível utilizar esta pastilha numa outra broca, entre outros. Foram tidas algumas precauções do ponto de vista comercial e posição de mercado. Na Figura 38 encontra-se o aspeto gráfico da pastilha modelada.

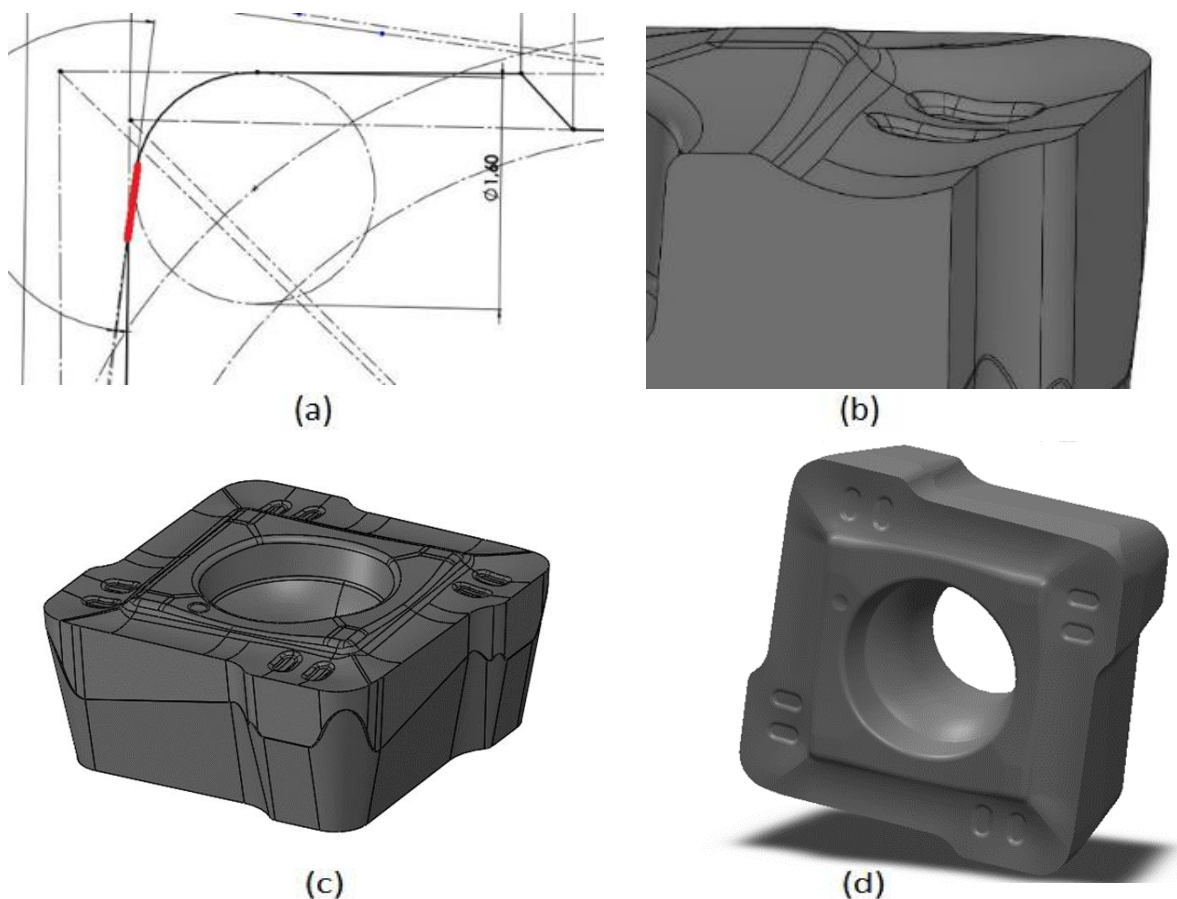


Figura 38: Modelação da pastilha: a) aresta alisadora tangente ao raio de ponta, b) geometria do quebra-aparas, boleamentos presentes na pastilha, aresta viva da aresta de corte e pormenores da pastilha, c) e d) pastilha final.

Após a pastilha ter sido projetada, deu-se início à elaboração do corpo da broca. Contou-se com um modelo de broca já pré-definido pela Palbit contendo as cotagens inerentes ao aperto da ferramenta no cone SK50 e diâmetro do corpo da broca. Este modelo inicial é utilizado na fabricação do corpo da broca, numa operação inicial de torneamento (Figura 39).

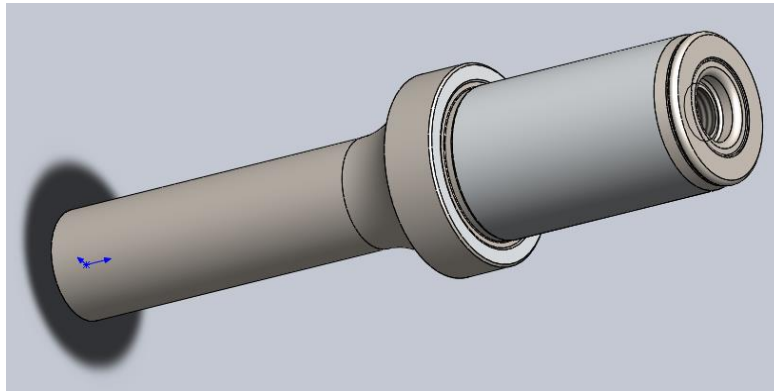


Figura 39: Modelo de broca utilizado com entidades referentes ao acoplamento no cone SK50.

Apenas é possível desenhar o corpo da broca após as pastilhas estarem definidas no espaço. Não é fiável apoiar as faces de apoio da pastilha nos planos anteriormente recolhidos pela máquina tridimensional. Durante o fabrico do corpo da broca existem desvios de cotas e ângulos, sendo que é necessário determinar constantes de posicionamento das pastilhas. Estas constantes são expostas aos clientes da Palbit no seu catálogo e, neste trabalho, é demonstrado como obtê-las:

- Ângulo radial da pastilha periférica;
- Ângulo radial da pastilha central;
- Ângulo axial da pastilha periférica;
- Ângulo axial da pastilha central.

Para prosseguir a obtenção destes ângulos, as pastilhas foram assentes nos respetivos planos de encosto da seguinte forma:

- Face da base da pastilha coincidente com respetivo plano de encosto;
- Face de encosto lateral coincidente com um ponto do respetivo plano de encosto;
- Segunda face de encosto lateral coincidente com um ponto do respetivo plano de encosto.

A razão de se utilizar apenas um ponto destes planos é meramente prática, pois ao definir estas relações a pastilha fica obrigatoriamente fixa no espaço. Dado aos desvios naturais do fabrico, se os planos fossem todos relacionados como sendo coincidentes, não era possível estabelecer as relações por desvios de centésimos de milímetro.

O ângulo radial é um ângulo no plano de trabalho (plano perpendicular ao eixo da ferramenta e coincidente com primeiro ponto da pastilha, plano onde começa a ser feito o corte numa operação de furação (Figura 40)) entre duas retas projetadas. Uma delas é a reta de interseção do plano da aresta de corte com o plano de trabalho (reta a). A outra é a reta (reta b) passante no centro do círculo de trabalho e na interseção do plano da aresta de corte com o círculo de trabalho (Ponto P). Com estas duas retas coplanares, é possível determinar o ângulo entre elas com uma vista perpendicular a esse plano (Figura 41). Pode ser positivo ou negativo. O valor do ângulo obtido da pastilha periférica foi de $-2^{\circ}28'$, o que foi aproximado a menos dois graus e meio. A pastilha central apresentava $18'$, sendo que foi arredondado para 0° .

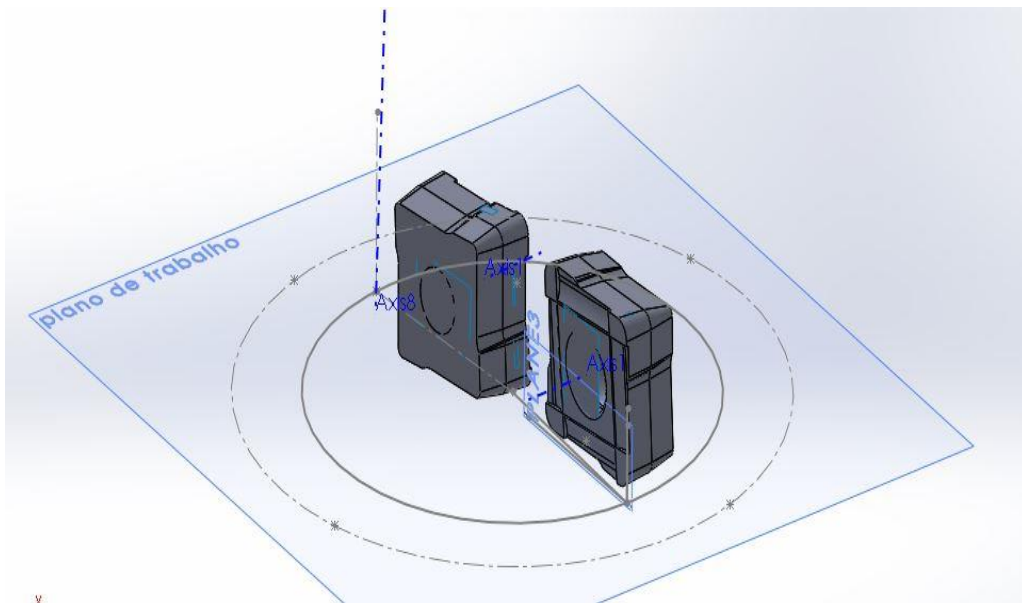


Figura 40: Plano de trabalho com pastilhas fixas nos planos de encosto.

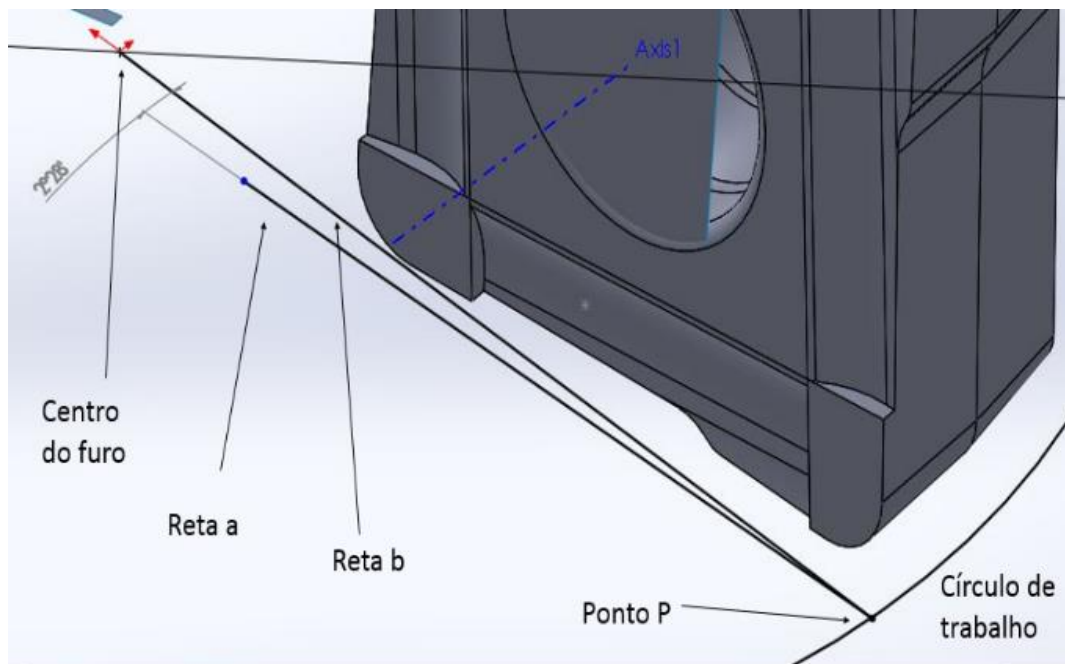


Figura 41: Ângulo radial na pastilha periférica.

O ângulo axial é um ângulo num plano perpendicular (plano ϕ) à reta b e coincidente com este ponto P. É feita a interseção entre o plano da aresta da pastilha e este plano ϕ , originando a reta c. A última reta necessária (reta d) é perpendicular ao plano de trabalho e passante no ponto P. O ângulo formado por estas duas retas no plano ϕ retrata o ângulo axial (Figura 42). Pode ser positivo ou negativo. O ângulo axial da pastilha central tem o valor de $2^{\circ}25'$, arredondando para dois graus e meio. A pastilha periférica possuía $8'$, sendo arredondado para 0° .

Com a recolha destas constantes prosseguiu-se para uma nova montagem e afixamento das pastilhas com os novos valores. Apenas com estas constantes não é possível fixar as pastilhas no espaço. Foi então introduzido o fator da AA, sendo imposto uma condição de fronteira de forma a que a AA tivesse um ângulo de $30'$ com a reta d. A última condição imposta foi a distância do ponto mais próximo do plano de trabalho a esse plano. A pastilha periférica está definida. A pastilha central tem como condições de fronteira a coincidência com o plano de trabalho, o ângulo de balanceamento com a outra pastilha e o ângulo da aresta de corte K_r com plano de trabalho.

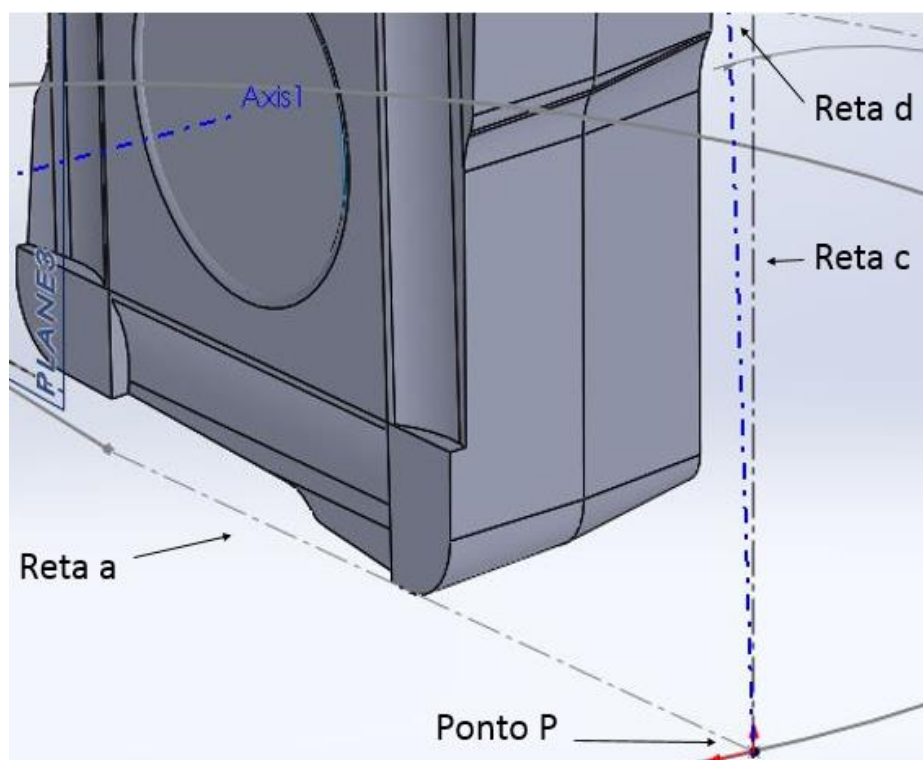


Figura 42: Ângulo axial da pastilha central.

Partindo do modelo da broca predefinido foi possível modelar os alojamentos das pastilhas, as hélices, o furo para o parafuso, furos da refrigeração interna entre outros pormenores (Figura 43 e Figura 44). É importante referir que o furo para parafuso na broca não é concêntrico com o furo da pastilha de forma propositada. O furo está desviado em direção a uma interseção teórica de duas arestas complanares de apoio da pastilha (uma reta em cada face, sendo o plano paralelo à base). Este desvio é essencial, pois obriga a pastilha a ser “empurrada” para o canto. Os desvios são minimizados com as elevadas forças num processo de furação.

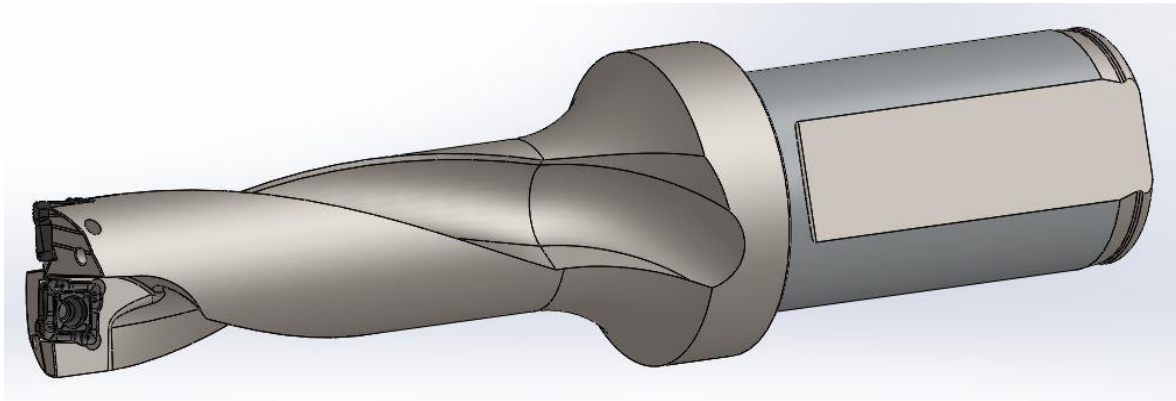


Figura 43: Broca final projetada

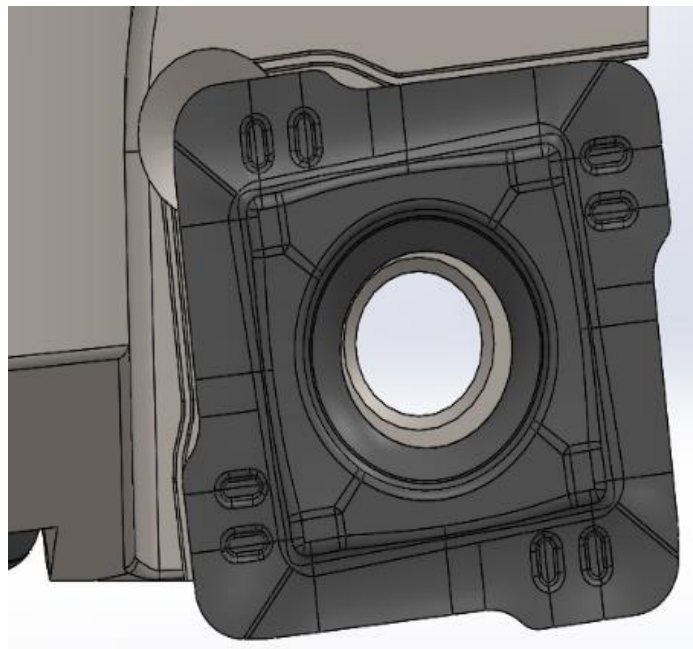


Figura 44: Alojamento da pastilha periférica.

3.5. Desenho técnico

Após a modelação dos dois componentes foi elaborado um desenho técnico em 2D de cada elemento. Na realização destes desenhos foi tido em conta as cotas chave e as suas tolerâncias dimensionais necessárias. Foi tendo em vista a elaboração de um desenho limpo e de fácil compreensão.

Relativamente às tolerâncias dimensionais, estas são controladas pelo departamento de controlo da Palbit. Algumas tolerâncias essenciais ao bom funcionamento da pastilha num processo de corte são:

- Tolerância de $\pm 0,05$ mm do diâmetro do círculo circunscrito;
- Tolerância de $\pm 0,05$ mm do diâmetro do círculo externo;
- Tolerância de $\pm 0,05$ mm da altura da aresta de corte;
- Concentricidade do círculo externo com círculo circunscrito de $\pm 0,05$;
- Rugosidade da base da pastilha Ra 0,4.

Estas tolerâncias foram definidas pela Palbit e funcionam para todas as pastilhas presentes no catálogo. No processo de fabrico da pastilha são necessários três desenhos técnicos diferentes, sendo que cada um deles é referente a passagens diferentes no seu fabrico:

- Final;
- Blank;
- Verde;

Referente ao corpo da broca, este é desenhado com pastilhas acopladas, servindo de controlo após manufatura deste. Algumas tolerâncias tidas em atenção são:

- Tolerância do diâmetro de $\pm 0,1$ mm (definido pela pastilha periférica);
- Veio h6 com tolerância do diâmetro $0/-0,016$ mm;
- Parede retificada h13 com tolerância $-0,33$ mm.

3.6. Fabrico dos componentes

Com os componentes modelados, o fabrico da pastilha entrou no sistema da Palbit com uma ordem de fabrico. Foram elaborados todos os componentes adicionais necessários por colaboradores especializados. A manufatura da pastilha tem a seguinte ordem de operações:

- Prensagem direta do pó de metal duro. Para realizar esta operação é necessário o desenho técnico Verde que não é mais que um fator de ampliação relativamente ao Blank. Para realizar a prensagem foi necessário fabricar o punção inferior, o punção superior, a vareta e a matriz.
- Sinterização. É utilizado aqui o desenho técnico Blank. Num processo de sinterização a pastilha de metal duro sofre uma redução do seu tamanho (o que origina a sua elevada

dureza). Este fator de escala é conhecido pela Palbit e aplicado em todos os seus produtos.

- Retificação plana da base. Tendo a base uma tolerância de rugosidade esta é sempre retificada na sua base. Obtém-se a pastilha final representada pelo seu desenho técnico Final. A diferença entre o desenho Final e o Blank é apenas a base da pastilha.
- Tratamento da aresta através de boleamento por jateamento. Com pastilhas fabricadas foi necessário realizar boleamento das pequenas imperfeições que possa ter.
- Controlo. De seguida a pastilha passa no departamento de controlo de forma a ser avaliado o cumprimento das tolerâncias especificadas.
- Revestimento PVD.
- Por último a pastilha é armazenada no armazém e catalogada.

O corpo da broca foi fabricado fora das instalações da Palbit.

3.7. Ensaios finais

Com a ferramenta fabricada (denominada por **ferramenta 4**), esta foi ensaiada. Estes ensaios finais tiveram as mesmas CC que os ensaios iniciais. Foram então realizados mais 12 furos com toda a metodologia exposta anteriormente neste trabalho. Foi feita a recolha dos critérios de comparação e analisados.

Foram realizados estudos adicionais à parede do furo criado. Elaboraram-se dois furos (ferramenta 2 e 4, com CC definidas), tendo sido realizado um corte por eletroerosão a fio pelos eixos.

4. Análise e discussão de resultados

Nesta secção encontram-se expostos os resultados obtidos, bem como uma análise crítica e fundamentada dos mesmos. Como outrora foi referido neste documento, existem dois momentos de ensaios com propósitos diferentes. Dado a esta particularidade, este capítulo apresenta-se igualmente organizado em duas secções:

- Demonstração e análise dos ensaios iniciais;
- Demonstração e análise dos ensaios finais.

4.1. Resultados dos ensaios iniciais

Tendo como objetivo a seleção da pastilha a ser incorporada com a AA, foram recolhidos os parâmetros de comparação:

- Forma da apara;
- Potência despendida pela máquina-ferramenta na rotação da ferramenta durante o corte;
- Precisão dimensional do diâmetro do furo;
- Qualidade da superfície da parede do furo.

4.1.1. Formação da apara

Este parâmetro de comparação existe servindo como controlo. É apenas avaliado se a apara recolhida em cada ensaio tem a forma desejável (consoante o capítulo 2.2.1, a apara deve possuir forma helicoidal cónica elástica) e se foi expulsa corretamente da área de trabalho (interior do furo) durante a operação de furação. A análise é feita num sentido de aprovação ou negação do controlo da apara. Na Tabela 5 encontra-se o resumo da análise das aparas recolhidas.

Tabela 5: Aprovação do controlo da apara

Vc (m/min)	Ferramenta 1	Ferramenta 2	Ferramenta 3
120	Reprovado	Aprovado	Aprovado
160	Reprovado	Aprovado	Aprovado
200	Reprovado	Aprovado	Aprovado

A ferramenta 1 não teve desempenho satisfatório. Apesar de grande parte das aparas possuírem a forma desejada (apara central e periférica numa forma helicoidal cónica), criou-se igualmente uma apara indesejável: apara em fita (Figura 45) (totalidade das aparas recolhidas de cada ensaio da ferramenta 1 em anexo na Figura A1). Com a broca a não possuir capacidade física de

escoamento desta forma de apra, esta enrolou à volta da ferramenta, causando vários problemas ao processo de furação.

Seria necessário o operador da máquina remover constantemente a apra malformada da broca após cada operação que esta realizasse. Tempo precioso de maquinação seria gasto devido a este impedimento, contrariando todas as vantagens do ponto de vista da redução de tempo que o uso de brocas com pastilhas intercambiáveis deveria trazer.

A apra em fita influenciou o acabamento da superfície da parede do furo, deixando fortes reentrâncias na parede. Devido a estes constrangimentos, conclui-se que a ferramenta 1 não possui controlo da apra após a formação de apra em fita em diversos ensaios. Tendo este acontecimento ocorrido em diferentes CC, é excluída a possibilidade destas condições estarem envolvidas no aparecimento desta apra.

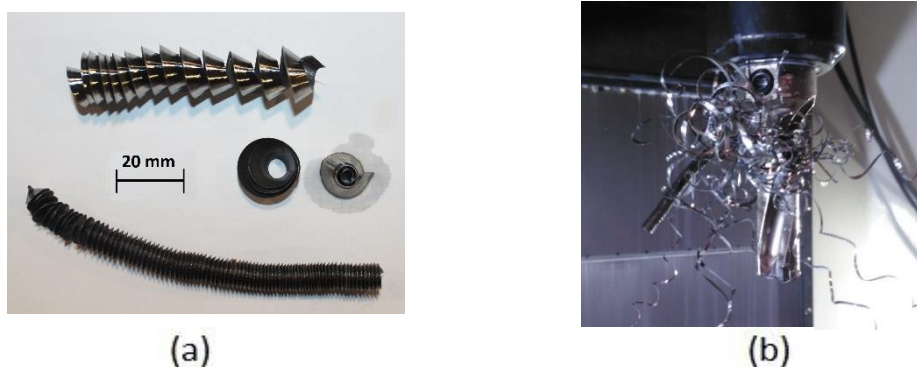


Figura 45: Aparas da ferramenta 1: a) aparas recolhidas no ensaio com $V_c=120$ m/min e $f_z=0,06$ mm/rot, b) apra em fita enrolada em torno da ferramenta.

Relativamente à apra formada pela ferramenta 2, foi aprovada após possuir controlo da apra em todos os ensaios realizados. Em velocidade de corte mais elevadas, apareceu uma apra em arco. Na Figura 46 encontram-se estas aparas formadas (totalidade das aparas recolhidas de cada ensaio da ferramenta 2 em anexo na Figura A2). Apesar de não pertencer às aparas previstas, estas foram escoadas da zona de trabalho devido à sua pequena dimensão e fragmentação. Considerou-se que a ferramenta possuía controlo da apra após não existir formação de aparas indesejáveis.

Analogamente à apara formada pela ferramenta 3, foi aprovada após possuir controle da apara em todos os ensaios realizados. As aparas central e periférica possuem a forma desejável, sendo sempre uniforme desde o início até à rutura (Figura 47) (totalidade das aparas recolhidas de cada ensaio da ferramenta 3 em anexo na Figura A3).

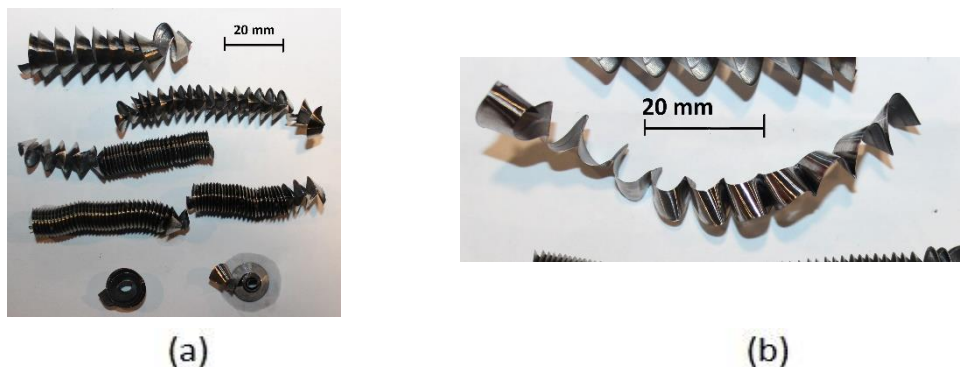


Figura 46: Aparas da ferramenta 2: a) apara recolhida no ensaio com $V_c=160$ m/min e $f_z=0,08$ mm/rot, b) apara em arco formada no ensaio com $V_c=200$ m/min e $f_z=0,06$ mm/rot.

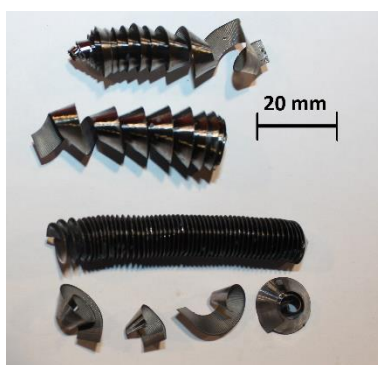


Figura 47: Aparas obtidas da ferramenta 3 no ensaio com $V_c=200$ m/min e $f_z=0,08$ mm/rot.

4.1.2. Potência consumida pela máquina-ferramenta

O critério de comparação da potência despendida pela máquina é útil no dimensionamento de uma ferramenta. É importante averiguar se uma determinada máquina tem potência necessária para efetuar um determinado furo, aspeto determinante para a indústria metalomecânica. Foi medida a variação da potência do fuso, ou seja, na rotação da ferramenta. Sendo a AA imposta no diâmetro máximo, a variação do binário é crítica. A Tabela 6 indica os resultados obtidos de potência

consumida para realização do furo da ferramenta 2. Os restantes resultados obtidos encontram-se em anexo na Tabela A1.

Tabela 6: Potência consumida registada durante os ensaios da ferramenta 2

fz (mm/rot)	Ferramenta 2	Vc (m/min)					
		120		160		200	
		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
0,06	Potência fuso (%) Pot. Máx. 43 kW	10	21	9	26	10	26
0,08		10	23	10	29	10	30
0,1		10	26	10	33	10	36
0,12		10	28	9	36	10	37

Analisando a tabela, a potência consumida é fornecida em percentagem. Esta percentagem é referente à potência máxima da máquina ferramenta. Esta operou com um máximo de 43 kW.

Um segundo aspeto é a potência utilizada na rotação antes de começar o processo de corte. A informação oferecida pela máquina-ferramenta possui precisão de uma unidade. Tendo em todos os ensaios registados, independentemente da ferramenta, sido de 9 ou 10 %, conclui-se que, ao analisar a variação da potência, seria adicionar mais incerteza (sendo duas medições em vez de apenas uma). Foi então efetuada uma comparação da potência final e não da variação (Figura 48, Figura 49 e Figura 50).

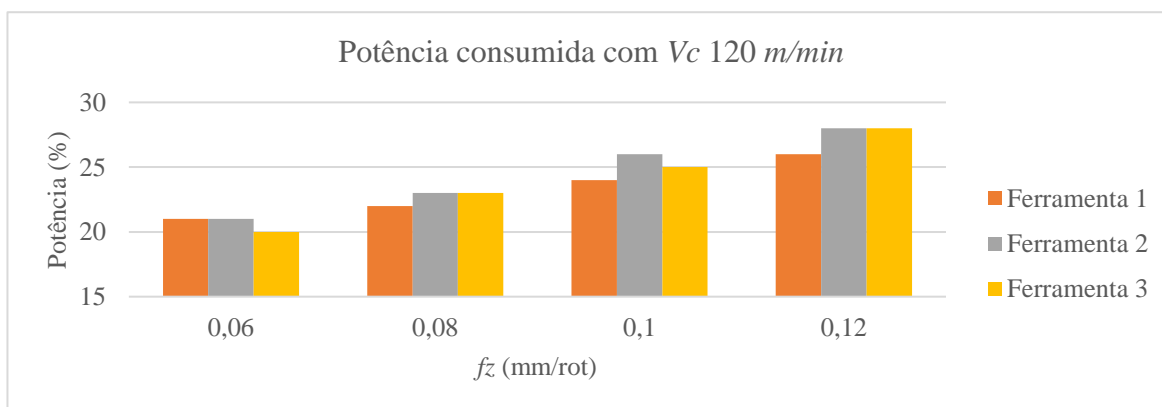


Figura 48: Gráfico comparativo de Potência consumida com Vc 120 m/min

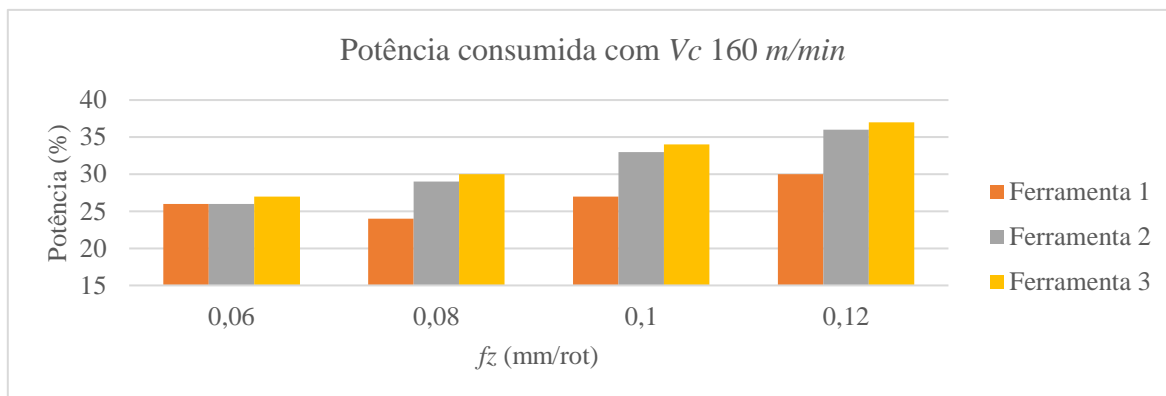


Figura 49: Gráfico comparativo de Potência consumida com V_c 160 m/min

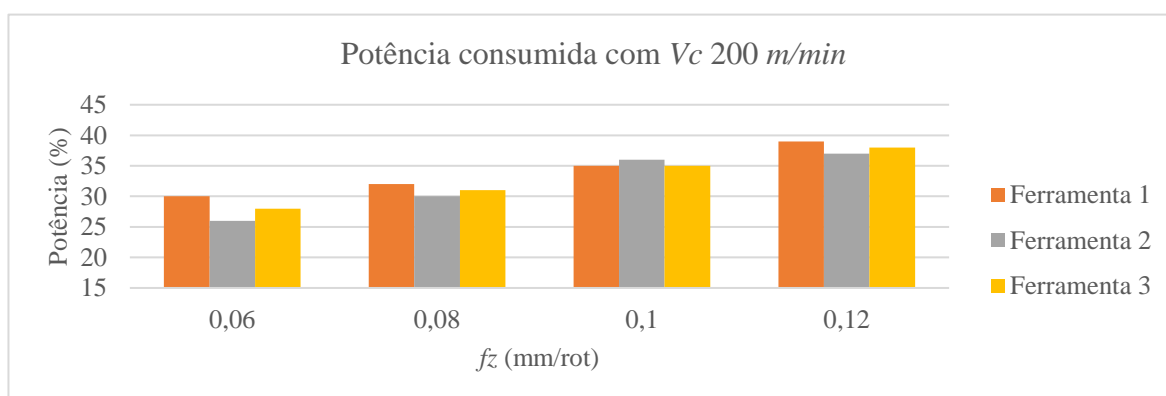


Figura 50: Gráfico comparativo de Potência consumida com V_c 200 m/min

Analisando os gráficos, existe um aumento da potência consumida com o aumento de f_z em cada velocidade de corte para todas as ferramentas. Existe maior remoção de material devido ao aumento da área de contacto, ampliando o binário da rotação e consequentemente a potência exigida à máquina. A gama de valores da potência consumida é superior com V_c maiores. Com o aumento da rotação da ferramenta, esta necessita de remover a mesma quantidade de material num espaço de tempo mais reduzido (num mesmo f_z), originando um aumento da potência necessária.

Os valores de comparação estão apresentados na Tabela 7 para cada V_c . As duas ferramentas que são candidatas à incorporação da AA obtiveram resultados muito semelhantes, inclusive a variação máxima por cada V_c . A ferramenta 2 utiliza menor potência do que a ferramenta 3 num maior número de ensaios.

Tabela 7: Análise da potência consumida por cada Vc (120 / 160 / 200 m/min)

	Ferramenta 1	Ferramenta 2	Ferramenta 3
Pico mínimo de Potência por Vc (%)	21 / 24 / 30	21 / 26 / 26	20 / 27 / 28
Pico máximo de potência por Vc (%)	26 / 30 / 39	28 / 36 / 37	28 / 37 / 38
Variação máxima por Vc (%)	4 / 6 / 13	7 / 10 / 11	8 / 10 / 10
Variação máxima total (%)	18	16	18

4.1.3. Precisão dimensional do diâmetro do furo

Sendo a furação com pastilhas intercambiáveis mais instabilidade relativamente a brocas inteiriças, é importante possuir um critério de comparação que a possa retratar. Foi medido o diâmetro de todos os furos em três zonas diferentes e catalogado os resultados. As medições realizaram-se no início, meio e fim do furo, denominado por diâmetro ensaio 1, 2 e 3, respetivamente. A Tabela 8 demonstra um os resultados obtidos para a ferramenta 2. A totalidade dos resultados encontram-se em anexo na Tabela A2.

Tabela 8: Diâmetros do furo medidos em cada ensaio da ferramenta 2.

Ferramenta 2						
fz (mm/rot)	Nº furo	D. Ens 1 (mm)	D. Ens 2 (mm)	D. Ens 3 (mm)	D. Méd (mm)	Variação (mm)
Vc 120 m/min						
0,06	1	24,16	24,155	24,16	24,158	0,106
0,08	2	24,174	24,179	24,163	24,172	0,120
0,1	3	24,198	24,178	24,182	24,186	0,134
0,12	4	24,212	24,192	24,197	24,200	0,148
Vc 160 m/min						
0,06	5	24,165	24,165	24,162	24,164	0,112
0,08	6	24,19	24,18	24,17	24,180	0,128
0,1	7	24,205	24,168	24,18	24,184	0,132
0,12	8	24,233	24,212	24,194	24,213	0,161
Vc 200 m/min						
0,06	9	24,185	24,18	24,163	24,176	0,124
0,08	10	24,196	24,17	24,173	24,180	0,128
0,1	11	24,207	24,19	24,165	24,187	0,135
0,12	12	24,215	24,208	24,195	24,206	0,154

Esta diferença de diâmetro é efetuada entre o diâmetro do furo realizado e o diâmetro real da ferramenta, medido com a **Zoller venturion 450** (Tabela 9). Não é feita a diferença para o diâmetro 24 mm, pois o diâmetro da broca tem tolerâncias, não existindo cotas nominais e exatas. É obtido uma medição mais precisa.

Tabela 9: Diâmetro real das ferramentas.

Ferramenta	Diâmetro real (mm)
1	23,848
2	24,052
3	24,040

Na fase inicial do furo existe uma maior variação que tende a ser melhor controlado com a continuidade da furação. Isto acontece devido à entrada da ferramenta no material. Existe uma pastilha que começa o processo de corte mais cedo que a outra, não existindo o balanceamento das forças radiais dado pela outra pastilha. A primeira pastilha a perfurar o material é a central, sendo que o braço na realização do binário é menor. Esta variação é melhor notada em velocidade de corte maiores. Os gráficos comparativos entre as diferentes ferramentas encontram-se na Figura 51, Figura 52 e Figura 53.

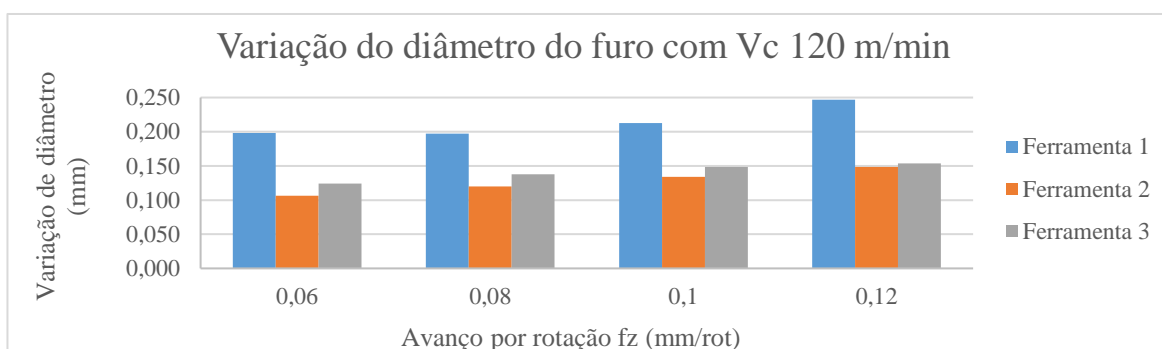


Figura 51: Gráfico comparativo da variação do diâmetro do furo com Vc 120 m/min

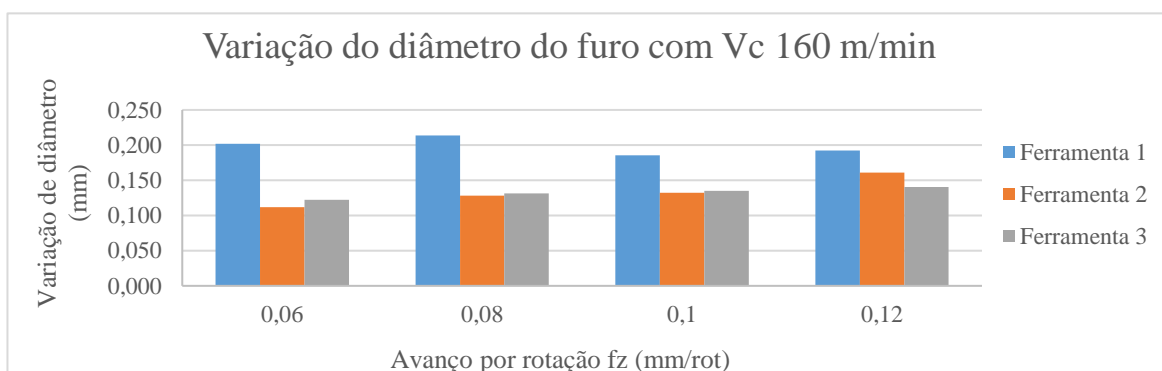


Figura 52: Gráfico comparativo da variação de diâmetro do furo com Vc 160 m/min

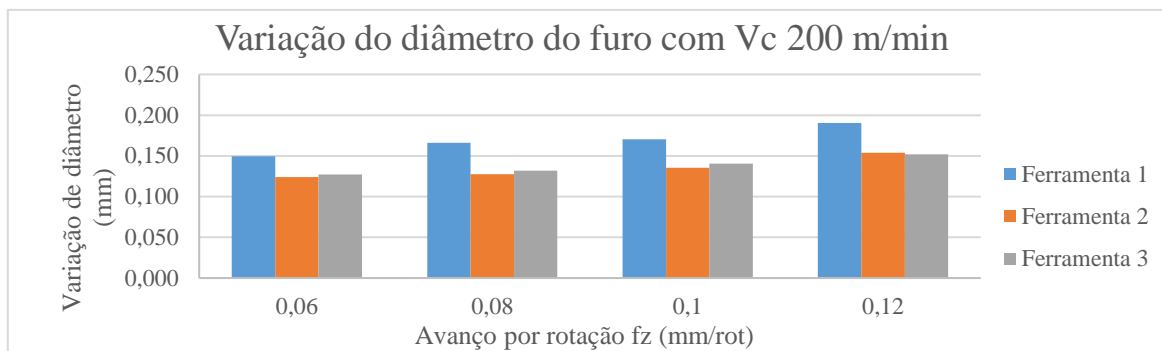


Figura 53: Gráfico comparativo da variação de diâmetro do furo com V_c 200 m/min

A ferramenta 1 teve maior variação em todos os ensaios comparativamente às restantes. Foi considerada a variação de 0,15 mm como sendo a barreira máxima aceitável (de acordo com capítulo 2). Este valor foi ultrapassado múltiplas vezes pela ferramenta 1 e alcançado pelas outras duas em velocidades de corte maiores. Sente-se assim necessidade de perceber a razão das ferramentas não conseguirem melhores resultados.

A instabilidade num processo de furação depende amplamente das forças dinâmicas a serem aplicadas durante o corte. Com os pormenores geométricos da aresta de corte das pastilhas das ferramentas 2 e 3, existem forças que poderão não estar a ser tidos em conta. Se estas forças não forem balanceadas corretamente obtém-se desvios, tal como aconteceu nestes ensaios. Todo este processo tem diversas variáveis que influenciam as forças dinâmicas, tais como o ângulo de ataque, a geometria do quebra-aparas, o ângulo de balanceamento, a geometria da aresta de corte, etc...

As ferramentas 2 e 3 obtiveram resultados semelhantes, com ligeira vantagem dado ao desempenho da ferramenta 2, tendo nas velocidades mais baixas a maior variação entre estas. Em todas as ferramentas denota-se que existe um ligeiro acréscimo de variação do diâmetro com aumento de f_z em cada V_c . Tal como na potência despendida pela máquina-ferramenta, deve-se ao aumento da área de contacto, originando forças tangenciais superiores. Variando a velocidade de corte V_c , os resultados mantêm-se semelhantes com o respetivo f_z . Apesar das forças serem bastante superiores numa V_c 200 m/min comparativamente a V_c 120 m/min, estas são balanceadas da mesma maneira, não existindo grande variação do diâmetro do furo.

4.1.4. Acabamento de superfície da parede do furo

O acabamento de superfície é considerado um aspeto crucial em processos de maquinação. Foi, então, utilizado um critério de comparação que o possa retratar. Foram realizadas várias medições recolhendo a rugosidade média aritmética (Ra) em cada furo. Numa metodologia semelhante à medição do diâmetro do furo, foram realizados 3 ensaios em cada furo, realizando posteriormente uma média simples.

Na realização das medições, houve algumas restrições dado às condições físicas dos componentes utilizados. Devido ao reduzido comprimento máximo que a ponteira do rugosímetro alcança, as medições foram realizadas numa zona próxima da entrada do furo, com algum espaçamento entre cada. Foi utilizado um *cut-off* de 0,8 mm, sendo a medição efetiva de 4 mm. Na Tabela 10 encontram-se os resultados inerentes à ferramenta 2 (restantes ferramentas em anexo na Tabela A3). Os gráficos comparativos entre ferramentas encontram-se na Figura 54, Figura 55 e Figura 56.

Tabela 10: Valores recolhidos de Ra da superfície do furo realizado pela ferramenta 2.

Ferramenta 2					
fz (mm/rot)	Nº furo	Ra (μm) Ens1	Ra (μm) Ens2	Ra (μm) Ens3	Ra (μm) Média
Vc 120 m/min					
0,06	1	0,653	0,591	0,635	0,626
0,08	2	0,784	0,739	0,747	0,757
0,1	3	0,754	0,693	0,752	0,733
0,12	4	0,832	0,726	0,849	0,802
Vc 160 m/min					
0,06	5	0,8	0,814	0,784	0,799
0,08	6	1,003	1,088	1,033	1,041
0,1	7	1,044	1,047	1,111	1,067
0,12	8	1,276	1,367	1	1,214
Vc 200 m/min					
0,06	9	0,745	1,05	0,686	0,827
0,08	10	1,028	1,119	1,035	1,061
0,1	11	1,33	1,13	1,036	1,165
0,12	12	1,21	1,278	1,492	1,327

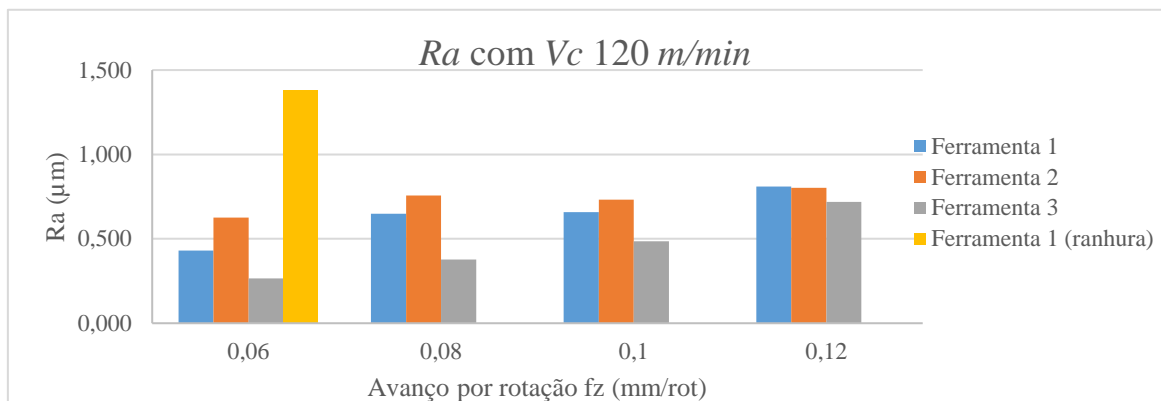


Figura 54: Gráfico comparativo da Rugosidade média aritmética (Ra) com Vc 120 m/min

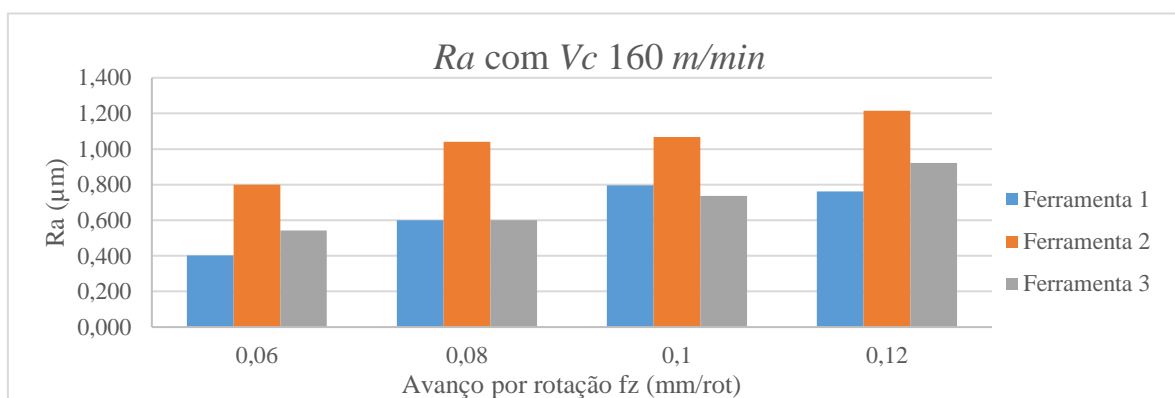


Figura 55: Gráfico comparativo da Rugosidade média aritmética (Ra) com Vc 160 m/min

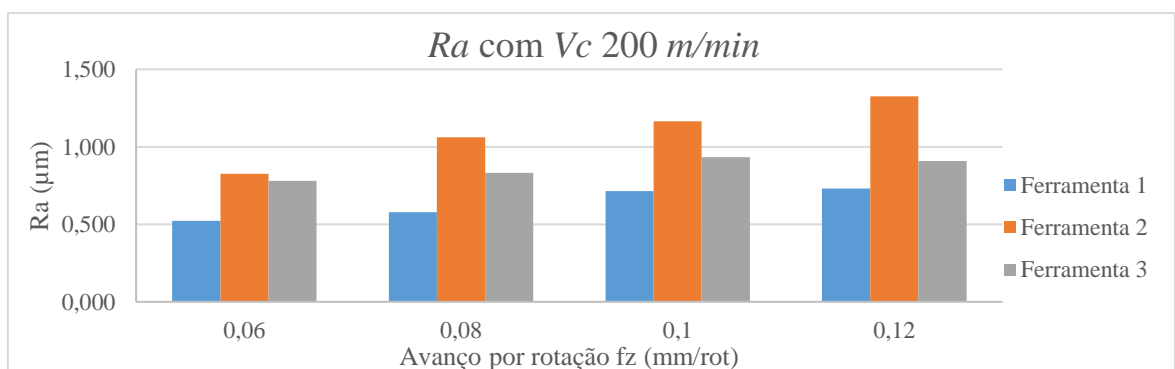


Figura 56: Gráfico comparativo de Rugosidade média aritmética (Ra) com Vc 200 m/min

Como anteriormente foi referido, a ferramenta 1 em vários ensaios danificou a parede do furo. Estas reentrâncias foram observadas em cotas mais profundas no furo, não tendo a ponteira do rugosímetro alcance suficiente para efetuar medições nestes. Apenas foi conseguido uma medição

alcançando os rasgões, que aconteceu no primeiro furo, com V_c de 120 *m/min* e f_z 0,06 *mm/rot*. Este valor é muito superior aos restantes obtidos nesta velocidade de corte. Contudo, apresentam-se os resultados da ferramenta 1 em paredes sem os fortes rasgões.

Em cada V_c , nota-se um aumento de R_a com o f_z em todas as ferramentas, devido ao avanço da ferramenta ser superior em f_z maiores. A rugosidade média aritmética é proporcional ao avanço. Foram obtidas rugosidades mais elevadas em velocidades de corte superiores. Obteve-se o maior valor de R_a pela ferramenta 2 numa V_c de 200 *m/min* e f_z de 0,12 *mm/rot* (1,327 μm) e a menor pela ferramenta 3 numa V_c de 120 *m/min* e f_z 0,06 *mm/rot* (0,266 μm).

Relativamente a comparação entre as ferramentas, a ferramenta 1 é excluída devido à sua medição correta não ter sido conseguida. A ferramenta 2, tendo em todos os parâmetros de comparação anteriores uma certa semelhança com a ferramenta 3, obteve pior nível de acabamento em todos os ensaios.

4.1.5. Conclusões e escolha da ferramenta

Nesta secção é feito um resumo da análise dos parâmetros de comparação obtidos e a escolha da ferramenta a ser incorporada com a aresta alisadora AA.

Inerente ao controlo da apara, a ferramenta 1 foi reprovada após não conseguir controlar a apara formada, dando origem à ruína da parede do furo. As ferramentas 2 e 3 foram aprovadas.

Relativamente à potência despendida pela máquina-ferramenta, a ferramenta 1 precisou de menos potência em comparação com as outras duas em velocidades mais baixas, sendo que nas mais altas manteve-se equiparada com as restantes. A ferramenta 2 obteve resultados ligeiramente melhores que a ferramenta 3.

Na precisão dimensional do furo, a ferramenta 1 obteve os piores resultados, sendo que as outras duas ferramentas obtiveram desvios elevados. Não foram capazes de anular força resultante radial, surgindo vibrações.

Relativamente ao acabamento superficial do furo, nas zonas de ranhuras efetuados pela ferramenta 1, teve o valor mais elevado de R_a , sendo que as medições nas paredes não afetadas não podem ser utilizadas como comparação. A ferramenta 2 obteve piores valores de R_a comparativamente à ferramenta 3.

Analisando os parâmetros de comparação optou-se que fosse a ferramenta 2 a ser incorporada com a AA. Tendo resultados semelhantes, e até mesmo algo superiores, com a sua concorrente, o seu pior comportamento na qualidade da superfície do furo foi a principal razão para esta escolha. É então pretendido que, com a adição da AA, esta ferramenta possa ser mais competitiva no mercado. Outra razão tida em conta, e num ponto de vista económico, os clientes da Palbit preferem possuir apenas um tipo de pastilha em *stock* para cada ferramenta que possuem. Esta nova ferramenta teria mais capacidade de ser vendida ao invés de ferramentas com 2 pastilhas diferentes.

4.2. Resultados dos ensaios finais

O objetivo dos ensaios finais é averiguar a interferência da adição da AA. Os ensaios foram realizados nas mesmas condições que os iniciais. Foram recolhidos resultados inerentes a apara formada, potência despendida pela máquina-ferramenta, precisão dimensional do diâmetro do furo e qualidade superficial da parede do furo, respetivamente.

4.2.1. Formação da apara

Apesar da ferramenta 2 ter tido controlo e forma desejável da apara, a nova ferramenta (denominada por **ferramenta 4**) não realizou a forma da apara central desejável (Figura 57). Esta não conseguiu perfazer a forma cónica, formando apara em arco em todos os ensaios e aparecendo rasgões na parede do furo. Não tendo sido formada a apara longa em fita, estes rasgões não são causados por este tipo de apara. Os rasgões possuem origem nas aglomerações de aparas em arco (Figura 58), muito duras, que não conseguem ser escoadas eficientemente. Sendo a parede do furo menos rígida que o aço da broca, a apara a ser escoada danifica a parede, deixando os rasgões. Isto é um aspeto preocupante no desempenho desta ferramenta que irá interferir com todos os restantes critérios de comparação.

É descartada a interferência da AA como causadora da forma em arco. Esta apara é criada pela pastilha central, não tendo influência a AA (no trabalho da pastilha central, toda a aresta de corte efetua o corte). A origem desta pode ter diversos fatores.

Numa primeira instância o quebra- aparas será determinante. Podendo a sua geometria ser demasiado côncava, originaria temperaturas de corte superiores, com a apara a enrolar mais rapidamente do que o pretendido. Outro fator a ter em atenção será o espaço em que a apara está a

ser formada. Apesar da apara estar a enrolar no quebra-aparas da pastilha, esta é prolongada, colidindo nas paredes da broca ou do furo. Este compartimento pode não possuir espaço suficiente para a apara poder ser formada e depois extraída. Outro fator relaciona-se com a posição da pastilha durante o corte. Os ângulos radial ou axial poderão estar demasiado inclinados, em que meio grau poderá fazer diferença. Inerente ao escoamento da apara, a hélice poderá não estar com espaço suficiente para escoar as aparas, em que o seu ângulo poderá também ter interferência.

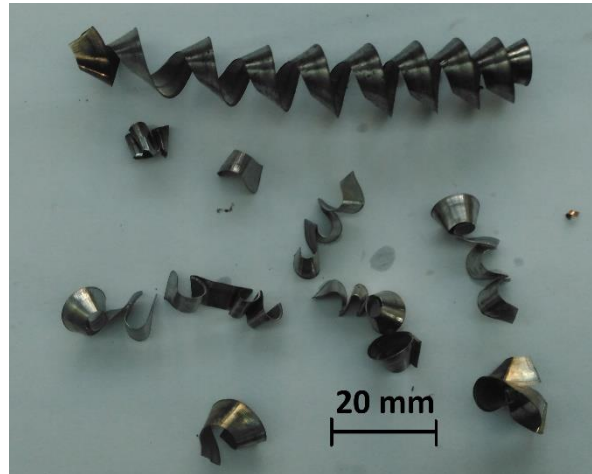


Figura 57: Aparas recolhidas com ferramenta 4.



Figura 58: Aglomerado da apara em arco (ensaio $V_c=200$ m/min e $f_z=0,06$ mm/rot) que não foi extraído da zona de corte sem danificar a parede do furo.

O procedimento para descobrir a origem destas aparas seria a realização de uma investigação com um estudo iterativo, variando todos estes pormenores. Este processo é natural na indústria e

trata-se da otimização da ferramenta (tendo em conta que a ferramenta fabricada é um protótipo). Conclui-se que de momento a ferramenta controla a apara formada por não realizar aparas em fita e perfazer constantemente o mesmo tipo de apara, mas necessita de ser otimizada se for pretendido que esta ferramenta chegue ao mercado.

4.2.2. Potência consumida pela máquina-ferramenta

A recolha do critério de comparação foi efetuada em similaridade com os ensaios iniciais. Foi apontado o valor máximo traduzido pela própria máquina-ferramenta. Na encontram-se os resultados obtidos. Tal como nos ensaios preliminares, a potência inicial é desprezada e apenas comparada a potência final. Na Figura 59, Figura 60 e Figura 61, encontram-se os gráficos comparativos da ferramenta 4 com a ferramenta 2.

Tabela 11: Potência consumida pela máquina-ferramenta durante os ensaios da ferramenta 4

		Vc (m/min)					
		120		160		200	
fz (mm/rot)	Ferramenta 4	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
0,06	Potência fuso (%) Pot. Máx. 43 kW	10	23	11	28	10	30
0,08		10	24	10	32	9	33
0,1		10	27	9	36	10	36
0,12		10	30	10	39	11	40

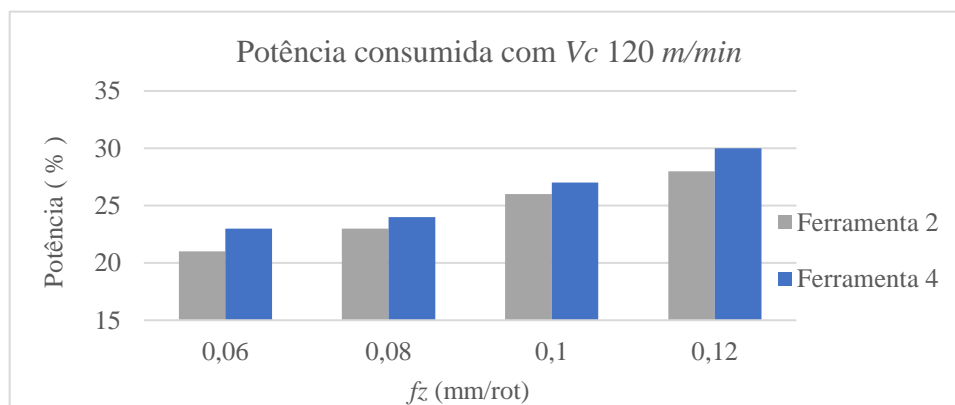


Figura 59: Gráfico comparativo de potência consumida com Vc 120 m/min das ferramentas 2 e 4.

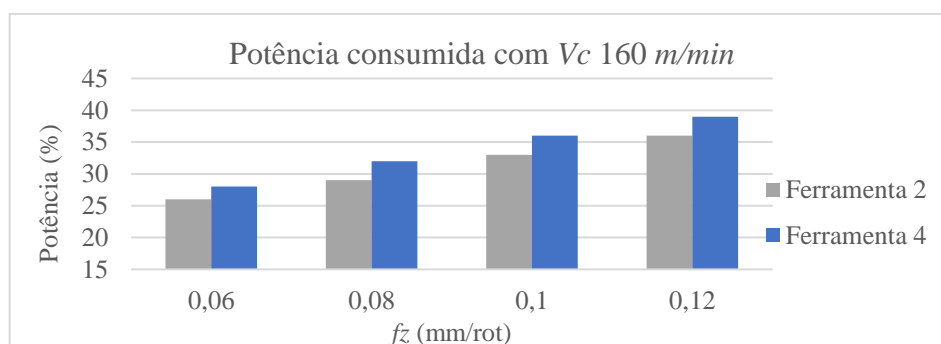


Figura 60: Gráfico comparativo de potência consumida com V_c 160 m/min das ferramentas 2 e 4.

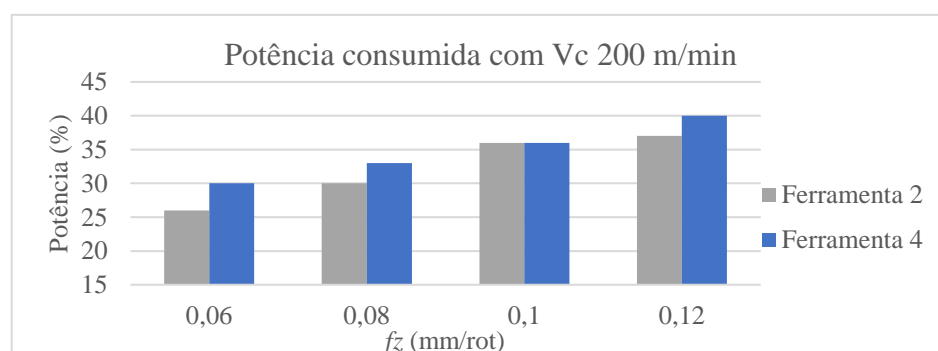


Figura 61 Gráfico comparativo de potência consumida com V_c 200 m/min das ferramentas 2 e 4

A potência consumida pela máquina-ferramenta para a realização dos furos com a ferramenta 4 é superior em todos os ensaios. Existe em média uma variação de 2% em velocidades de corte mais baixas e 3% na mais elevada. Numa avaliação global, possui a mesma tendência que as restantes ferramentas, com o aumento da potência consumida com o avanço por rotação fz e com o aumento de V_c .

4.2.3. Precisão dimensional do diâmetro do furo

Relativamente ao critério de comparação influenciado pelas vibrações da ferramenta, foi adotada a mesma metodologia dos ensaios iniciais. O diâmetro real da ferramenta 4 foi medido, sendo de 23,802 mm. Na Tabela 12 encontram-se os resultados de variação de diâmetro obtidos da ferramenta 4. Demonstra-se a respetiva comparação com a ferramenta 2 e 4 na Figura 62, Figura 63 e Figura 64.

Tabela 12: Valores recolhidos de diâmetro do furo efetuado pela ferramenta 4

Ferramenta 4						
<i>fz</i> (mm/rot)	Nº furo	D. Ens 1 (mm)	D. Ens 2 (mm)	D. Ens 3 (mm)	D. Méd (mm)	Variação (mm)
Vc 120 m/min						
0,06	1	23,850	23,840	23,835	23,842	0,040
0,08	2	23,845	23,835	23,845	23,842	0,040
0,1	3	23,855	23,845	23,835	23,845	0,043
0,12	4	23,860	23,845	23,845	23,850	0,048
Vc 160 m/min						
0,06	5	23,840	23,825	23,835	23,833	0,031
0,08	6	23,835	23,830	23,825	23,830	0,028
0,1	7	23,840	23,830	23,825	23,832	0,030
0,12	8	23,855	23,850	23,840	23,848	0,046
Vc 200 m/min						
0,06	9	23,835	23,825	23,825	23,828	0,026
0,08	10	23,835	23,835	23,830	23,833	0,031
0,1	11	23,850	23,835	23,835	23,840	0,038
0,12	12	23,860	23,855	23,850	23,855	0,053

Numa primeira análise da Tabela 12, observa-se a maior variação na fase inicial do furo, à semelhança das ferramentas testadas. Examinando os gráficos comparativos, verifica-se uma diminuição da variação do diâmetro com a utilização da ferramenta 4. Apresenta a mesma tendência do aumento com o *fz*, sendo que, nas diversas velocidades de corte, se mantêm semelhante. O valor mais alto alcançado foi de 0,053 mm na Vc e *fz* mais elevadas.

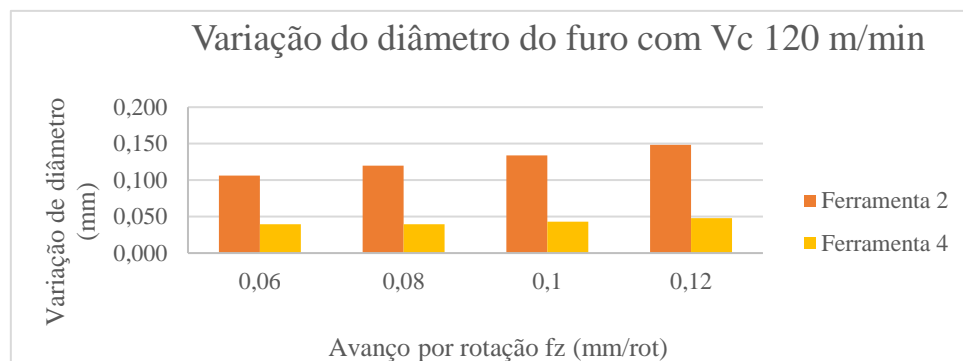


Figura 62: Gráfico comparativo da variação de diâmetro do furo com Vc 120 m/min das ferramentas 2 e 4

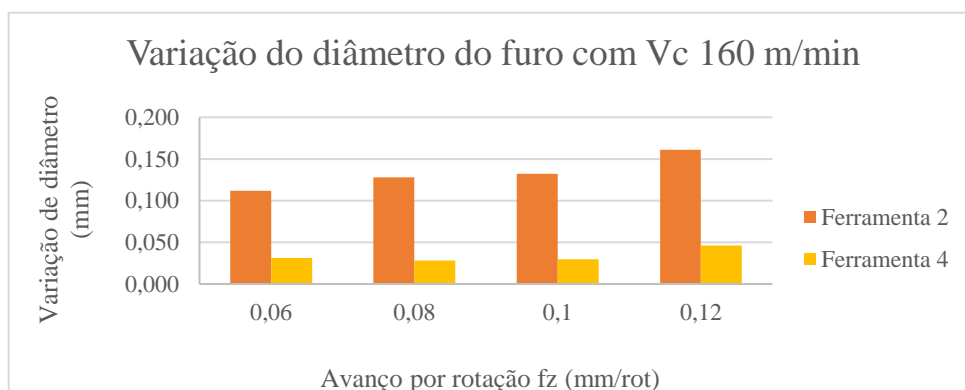


Figura 63: Gráfico comparativo da variação de diâmetro do furo com Vc 160 m/min das ferramentas 2 e 4

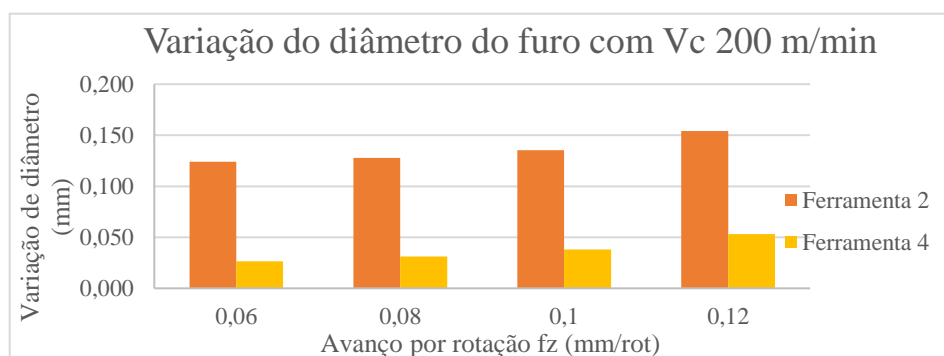


Figura 64: Gráfico comparativo da variação de diâmetro do furo com Vc 200 m/min das ferramentas 2 e 4

Existiu uma maior anulação das forças impostas, tendo a variação de diâmetro reduzido. A interferência da face alisadora completou forças não calculadas da ferramenta 2. Num outro ponto de vista, a inércia da broca pode ser superior, pois o espaço das hélices é menor.

4.2.4. Qualidade superficial da parede do furo

A rugosidade média aritmética é influenciada pelas reentrâncias obtidas nas paredes dos furos. Foi raro o ensaio de rugosidade que não tivesse esta interferência. Na Tabela 13, encontram-se os resultados obtidos de Ra , sendo imposto o mesmo comportamento experimental anteriormente executado. Os gráficos comparativos entre as duas ferramentas encontram-se na Figura 65, Figura 67 e Figura 66.

Tabela 13: Valores recolhidos de Ra da parede do furo efetuado pela ferramenta 4.

Ferramenta 4					
fz (mm/rot)	Nº furo	Ra (µm) Ens1	Ra (µm) Ens2	Ra (µm) Ens3	Ra (µm) Média
Vc 120 m/min					
0,06	1	0,303	0,262	0,495	0,353
0,08	2	0,41	0,684	0,484	0,526
0,1	3	0,297	0,427	0,367	0,364
0,12	4	0,495	0,455	0,464	0,471
Vc 160 m/min					
0,06	5	0,368	0,408	0,467	0,414
0,08	6	0,564	0,493	0,758	0,605
0,1	7	0,67	0,534	0,685	0,630
0,12	8	0,492	0,69	0,69	0,624
Vc 200 m/min					
0,06	9	0,302	0,378	0,858	0,513
0,08	10	0,369	0,6	1,146	0,705
0,1	11	0,754	0,525	1,125	0,801
0,12	12	0,965	0,778	0,955	0,899

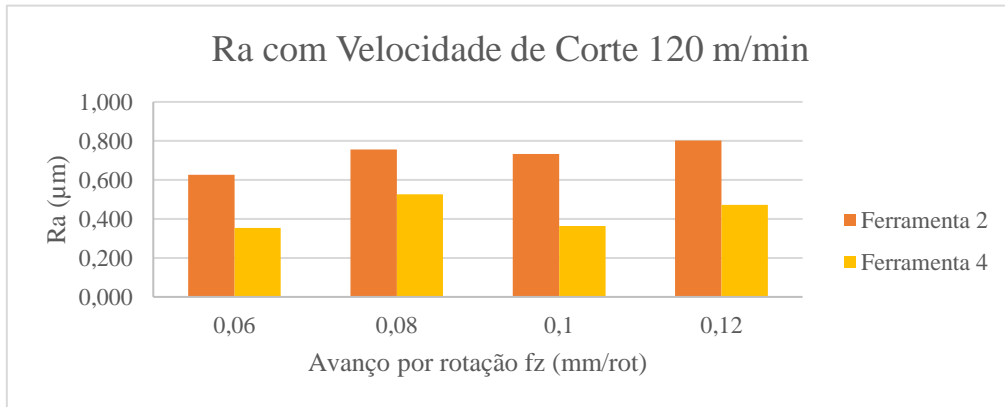


Figura 65: Gráfico comparativo de Rugosidade média aritmética com Vc 120 m/min das ferramentas 2 e 4

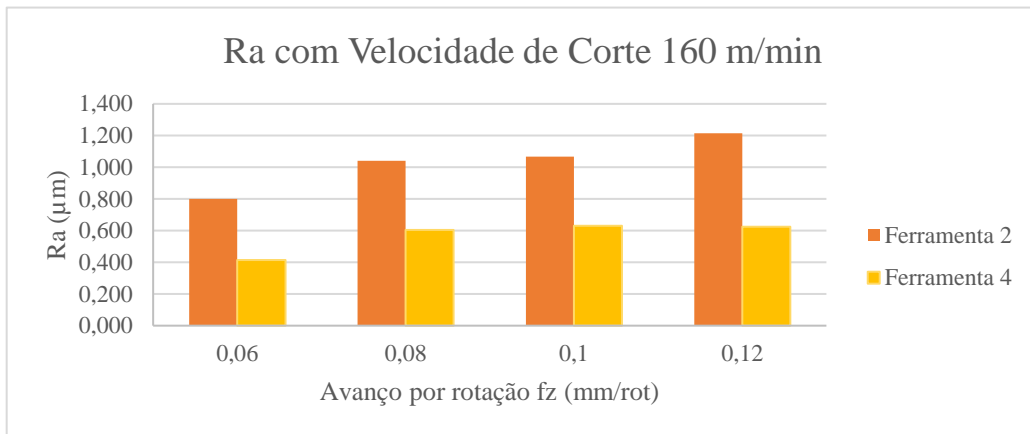


Figura 67: Gráfico comparativo de Rugosidade média aritmética com Vc 160 m/min das ferramentas 2 e 4

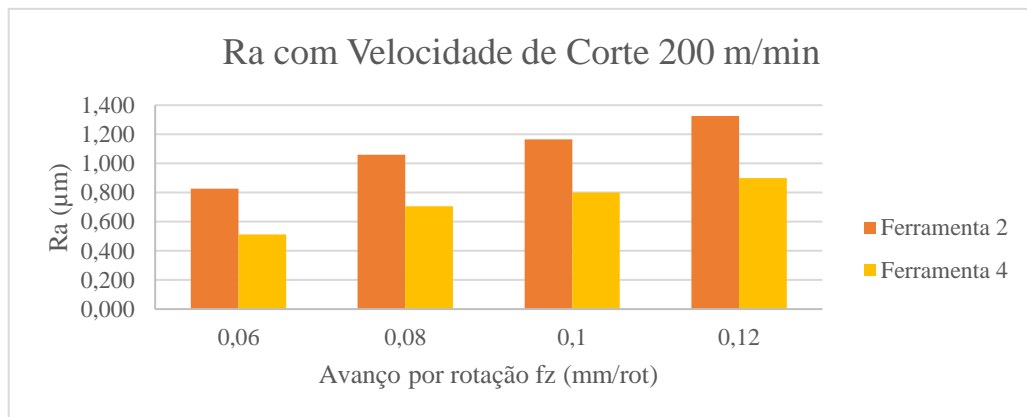


Figura 66: Gráfico comparativo de Rugosidade média aritmética com Vc 200 m/min das ferramentas 2 e 4.

Analisando a tabela 13, foram recolhidos valores com elevada variação para o mesmo furo. Tendo rasgões na parede, a ponteira do rugosímetro alcança estes de forma aleatória, sendo que foram efetuadas 3 medições em profundidades diferentes para cada furo. Nota-se que não existe qualquer relação com a profundidade a que se está a medir, pois o desnível encontra-se em todos os ensaios. No entanto, foram obtidas medições com menor valor de Ra . Dando o exemplo do terceiro furo (com $f_z = 0,1 \text{ mm/rot}$ e $V_c = 120 \text{ m/min}$), tem-se um resultado de $Ra = 0,297 \mu m$ numa medição, chegando a ser menos de metade da concorrente semelhante. Realizando a média das medições, o efeito do rasgão passa a estar envolvido, mas reduzindo o seu erro. Verifica-se o efeito da aresta alisadora nesta análise, pois apesar dos rasgões, os valores obtidos de Ra foram sempre inferiores à sua

semelhante. Não é possível fazer uma análise variando as velocidades de corte e avanço por rotação devido à aleatoriedade das reentrâncias medidas.

De forma a completar o estudo, foram realizados 2 furos, um com a ferramenta 2 e outro com a 4. Cada furo possuía as mesmas CC ($V_c = 160 \text{ m/min}$ e $f_z = 0,1 \text{ mm/rot}$). Após a execução destes, realizou-se um corte do bloco de ensaio com recurso a eletroerosão a fio, obtendo os furos cortados pelos seus eixos (Figura 68).



Figura 68: Eletroerosão a fio através de plano coincidente com eixo do furo. Furo 1 realizado pela ferramenta 4, furo 2 realizado pela ferramenta 2.

Recorreu-se à Organização IPN (Instituto Pedro Nunes, na área de Laboratório de Ensaios e Desgaste & Materiais) para ser feito um reconhecimento da parede do furo afim de poder observar o efeito da geometria *Wiper*.

As superfícies dos furos foram digitalizadas em 3D por recurso a um **microscópio ótico** da marca **Alicona modelo infinifocus** com uma ampliação de 100x. O levantamento da superfície teve início a 5 mm do final da furação com um comprimento de 20 mm, com o intuito de perceber a homogeneidade da maquinação. Na Figura 69 estão presentes as imagens das superfícies.

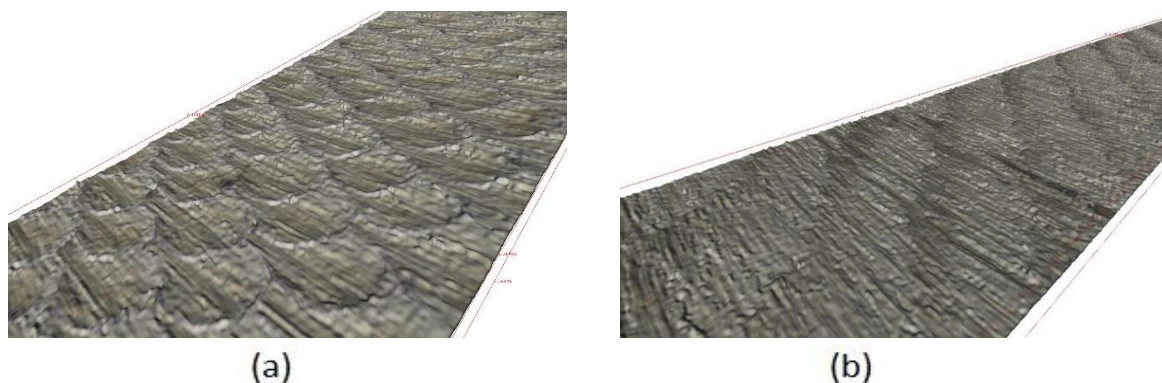


Figura 69: Superfície ampliada 100x da parede do furo: a) ferramenta 2, b) ferramenta 4 (cortesia do IPN)

Tendo um ponto de vista gráfico, observa-se o efeito da face alisadora. Na superfície maquinada pela ferramenta 4 constata-se uma superfície limpa, praticamente plana e com poucas imperfeições, contrastando com a superfície maquinada pela ferramenta 2, que se observa uma superfície bastante rugosa. Nesta última superfície, existem ondulações com determinada orientação em relação ao eixo do furo. Esta ondulação tem origem nas vibrações causadas, indiciando o ponto focado em 4.1.3. O rasto deixado pela pastilha da ferramenta 4 não é tão evidente como da 2, sendo que a ondulação causada pela vibração é menos visível.

As medições foram executadas como sendo de perfil rugoso, com um *cut-off* de 2.5 mm. Na Figura 70 e Figura 71 demonstram-se os dois gráficos de amplitude da medição efetuada. Obtiveram-se os parâmetros comparativos de R_a (rugosidade média aritmética), R_q (raiz quadrada média), R_t (máxima variação da amostra), R_z (variação média da amostra), R_p (valor máximo alcançado) e R_v (valor mínimo alcançado) (Tabela 14).

Existe uma diminuição de R_a com a adição da AA. Esta diminuição é de cerca de 15%. Ao analisar a figura 72, deteta-se a influência que um rasgão possui na passagem aos 16 mm da medição. Existem três desnivelamentos acentuados, atingindo o pico máximo e mínimo. A comparação de R_t exemplifica este ponto, tendo na ferramenta 4 um R_t superior à ferramenta 2. Já na avaliação de R_z , a ferramenta 4 conseguiu reduzir 15% da ferramenta 2.

Tabela 14: Parâmetros de rugosidade recolhidos dos 2 furos

Parâmetros	Ferramenta 4 (μm)	Ferramenta 2 (μm)
Ra	2,047	2,404
Rq	2,740	2,945
Rt	18,733	17,872
Rz	13,571	16,031
Rp	8,970	9,987
Rv	9,763	7,885

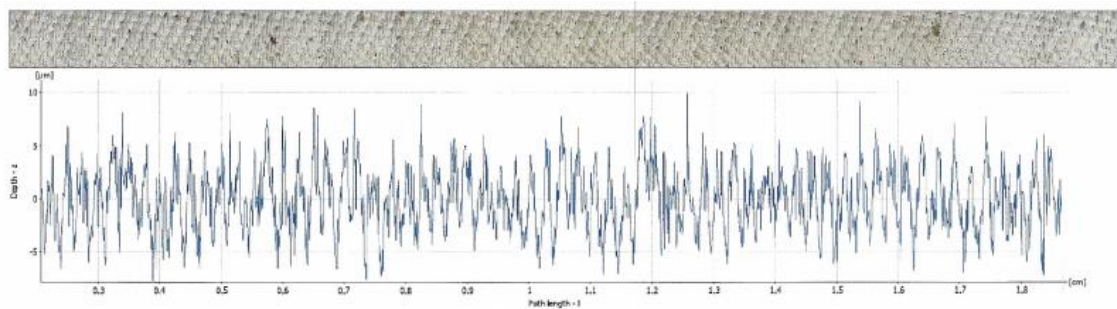


Figura 70: Análise 2D do perfil de rugosidade obtido da ferramenta 2 (cortesia do IPN).

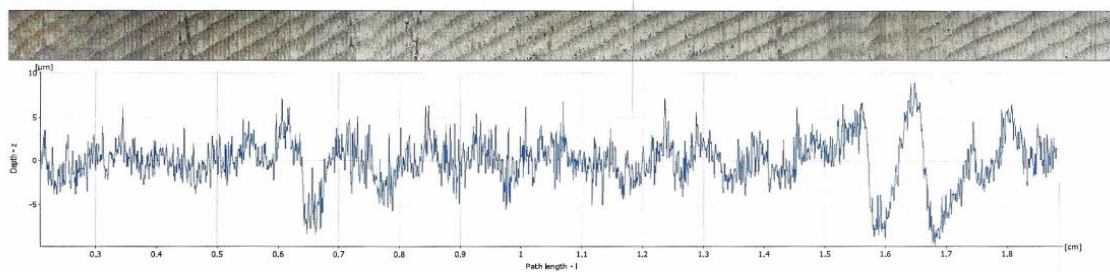


Figura 71: Análise 2D do perfil de rugosidade obtido da ferramenta 4 (cortesia do IPN).

5. Considerações Finais

5.1. Conclusões

Os objetivos delineados para a presente dissertação foram atingidos. Na primeira fase do projeto, foi conseguida uma comparação fundamentada pelos critérios de comparação de três ferramentas distintas. A finalidade destes ensaios foi a percepção comportamental do desempenho das diferentes ferramentas, validando os parâmetros de comparação de acordo com o estudo em causa. Foi escolhida a ferramenta para a incorporação da geometria *Wiper*. A forma da apara serviu como critério avaliativo do controlo da apara. A potência despendida pela máquina-ferramenta envolve-se com as forças da maquinação. A precisão dimensional do diâmetro do furo relaciona-se com as vibrações durante o furo, sendo que a qualidade da superfície do furo foi estudada através da análise da rugosidade.

A ferramenta 2 foi a escolhida para incorporar a geometria *Wiper* devido ao pior nível de acabamento alcançado, encontrando-se os restantes parâmetros comparativos semelhantes. Foi conseguida a modelação e manufatura dos componentes para análise.

Na segunda fase do projeto, a metodologia planeada foi executada, resultando na recolha dos mesmos parâmetros comparativos da fase inicial e a sua análise. Foi realizado um estudo comparativo entre a ferramenta 2 e 4, tendo esta última a incorporação da AA.

Da realização do trabalho experimental sumariado são apresentadas conclusões:

Controlo da apara

- O controlo da apara foi avaliado através da forma das aparas formadas pelas duas pastilhas de cada ferramenta. A ferramenta 1 não conseguiu controlar a apara, ao contrário das outras duas ferramentas.
- A forma da apara central formada pela ferramenta 1 foi elástica e helicoidal cónica fechada. A apara periférica foi elástica e de forma helicoidal cónica aberta. Formou-se apara em fita longa, enrolando à volta da ferramenta e originando rasgões na parede do furo.

- Com a utilização da ferramenta 2, obteve-se uma apara central elástica e helicoidal cônica fechada, sendo a periférica semelhante, mas aberta. Formou-se apara em arco em V_c mais elevadas.
- Na ferramenta 3, a apara central foi elástica e helicoidal cônica fechada, com a apara periférica helicoidal cônica aberta.
- A ferramenta 4 (**geometria Wiper**) desenvolvida no âmbito deste projeto, obteve apara periférica helicoidal cônica elástica. A apara central resultante em todos os ensaios apresentou forma em arco. Aglomerados desta forma de apara danificaram a parede do furo. A AA não tem interferência pois esta forma de apara surgiu da pastilha central, em que efetua corte em toda a aresta de corte.
- Não existiu qualquer apara em fita em todos os ensaios com esta ferramenta.
- É evidenciado a importância do controlo da apara num processo de furação.

Potência despendida pela máquina-ferramenta

- Critério comparativo fornecido pela percentagem de potência utilizada pela máquina-ferramenta durante o ensaio. Foi comparado a potência da rotação do fuso durante o corte, em vez da variação de potência entre o pré corte e durante o corte. Medida tomada para eliminar erros de aproximação.
- A potência aumenta proporcionalmente com a V_c e o f_z em todas as ferramentas.
- Ferramenta 1 apresenta menor potência consumida relativamente às restantes com $V_c = 120$ e 160 m/min , sendo superior com $V_c = 200 \text{ m/min}$.
- Ferramentas 2 e 3 consumiram potência semelhante em todos os ensaios.
- **Na análise da geometria Wiper**, a potência consumida com a presença da AA é superior. Acontece devido ao aumento da área de corte, elevando a P_s . Este aumento de potência foi de 2% (V_c inferiores) e 3% (V_c superior) da potência máxima da máquina-ferramenta relativamente à ferramenta 2 (sem geometria Wiper)

Variação do diâmetro do furo

- Critério comparativo para avaliação de vibrações, estando interligado com estas. Utilizou-se micrómetro de interiores para realizar ensaios e recolha do diâmetro do furo.
- A variação do diâmetro é maior na fase inicial do furo devido à entrada da ferramenta na peça.
- Ferramenta 1 foi a que apresentou maior desvio relativamente ao seu diâmetro real em todos os ensaios.
- As ferramentas 2 e 3 obtiveram resultados muito semelhantes, com ligeira vantagem dada à *performance* da ferramenta 2, tendo nas velocidades de corte mais baixas a maior variação entre estas.
- Existe acréscimo de variação com o aumento de f_z por cada V_c em todas as ferramentas.
- A V_c não interfere significativamente com a variação de diâmetro.
- De acordo com os resultados alcançados, a ferramenta 4 (**geometria *Wiper***) conseguiu controlar melhor as vibrações comparativamente à ferramenta 2, tendo obtido valores 3/4 vezes inferiores de variação do diâmetro do furo comparando à ferramenta semelhante. Foi conseguido um melhor balanceamento das forças radiais.
- A tendência da variação do diâmetro do furo da ferramenta com geometria *Wiper* é concordante com as restantes ferramentas. É crescente com o f_z , tendo pouca variação com a V_c . Existe maior variação na fase inicial do furo.

Qualidade superficial da parede do furo

- Foi avaliado através da recolha de parâmetros de rugosidade. O critério utilizado foi a rugosidade média aritmética (R_a).
- Ferramenta 1 não pôde ser analisada devido à presença de rasgões na parede do furo. Estes existindo e sendo inalcançáveis com a ponteira do rugosímetro, o valor recolhido não traduz a realidade.
- R_a aumenta com f_z e com V_c em todas as ferramentas.

- A rugosidade foi o critério com maior variação entre a ferramenta 2 e 3. Foi eleita a ferramenta 2 a ser incorporada com geometria *Wiper* com intuito de alcançar/ultrapassar valores obtidos pela ferramenta 3.
- **Relativamente à análise da geometria *Wiper***, a ponteira do rugosímetro alcançou diversas vezes os rasgões obtidos pela ferramenta 4, tendo registado variados valores. A utilização do critério Ra tende a suavizar as grandes variações, mas não são totalmente excluídas da análise.
- Não foi possível avaliar comportamento da ferramenta com geometria *Wiper* com variação de fz e Vc devido à aleatoriedade da medição com rasgões.
- Apesar das reentrâncias obtidas, a Ra com geometria *Wiper* é menor relativamente à geometria convencional.
- Num estudo adicional da superfície da parede do furo recorrendo a um microscópio ótico, foi conseguido a obtenção de mais parâmetros comparativos (Ra, Rq, Rt, Rz, Rp, Rv) e imagem digitalizada da superfície. Através deste exame é possível observar a interferência da geometria *Wiper*. Foi obtida uma superfície com menos imperfeições (excluindo as reentrâncias) e com critérios de rugosidade de amplitude inferiores (exceto Rt e Rv). Foi possível uma redução de 15% de Ra.

5.2. Trabalhos futuros

O estudo sobre a avaliação de geometria *Wiper* em processos de furação de AISI 4337 dá-se por terminado. Sendo este projeto pioneiro com esta configuração em furação, a quantidade de trabalhos possíveis é incontável. São apresentados alguns temas como possível investigação futura:

- Otimizar a ferramenta presente neste documento com intuito de uma melhor compreensão da formação de apara;
- Realizar trabalho semelhante com utilização de diferentes critérios comparativos, tais como utilização de acelerómetro para medição de vibrações, termopar para recolha de temperaturas ou análise de tempo de vida útil da ferramenta através de desgaste das pastilhas. Utilizar geometria convencional e *Wiper*;

- Analisar interferência dos ângulos posicionais das pastilhas, raio de ponta, quebra-
aparas ou hélice com utilização *Wiper*;
- Realizar trabalho semelhante a este projeto num processo de furação de diferentes
materiais (podendo ser por camadas, com intuito de observar o efeito do disco
projetado);
- Simulação numérica de furação com geometria *Wiper*.

Referências Bibliográficas

- [1] J. P. Davim, *Modern Machining Technology*, 1st ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011.
- [2] R. Viana and Á. R. Machado, “Desempenho de Revestimentos de Brocas na Usinagem de uma Liga Al-Si,” *13º POSMEC - Simpósio do Programa Pós-Graduação em Eng. Mecânica*, 1995.
- [3] V. P. Astakhov, *Geometry of Single-point Turning Tools and Drills*, 1st ed. London: Springer-Verlag London, 2010.
- [4] “Drill Geometry 247,” 2008. [Online]. Available: <http://www.toolingu.com/class/200247>. [Accessed: 09-Oct-2017].
- [5] M. Kaymakci, Z. M. Kilic, and Y. Altintas, “Unified cutting force model for turning , boring , drilling and milling operations,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 54–55, pp. 34–45, 2012.
- [6] “Palbit. S.A. - Ferramentas de corte, Anti-desgaste e Pedreiras.” [Online]. Available: <http://www.palbit.pt/pt/>. [Accessed: 29-Nov-2017].
- [7] V. P. Astakhov, *Drills: Science and Technology of Advanced Materials*. CRC Press, 2014.
- [8] J. P. Davim, *Princípios da Maquinagem*, 2nd ed. Porto: Publindústria, 2008.
- [9] “Sandvik Coromant: Fórmulas Furação.” [Online]. Available: https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/drilling/formulas_and_definitions/formulas/pages/default.aspx.
- [10] Y. Altintas, *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*, 2nd ed. Cambridge University Press, 2012.
- [11] W. W. Olson, S. A. Batzer, and J. W. Sutherland, “Modeling of Chip Dynamics in Drilling,” *CIRP Int. Work. Model. Mach. Oper.*, 1998.
- [12] M. C. Shaw, *Metal Cutting Principles*, 2nd ed. Oxford University Press, 2005.
- [13] Á. R. Machado, R. T. Coelho, A. M. Abrão, and M. B. Silva, *Teoria da Usinagem dos Materiais - Editora Blucher*, 3rd ed. Editora Blucher, 2015.
- [14] I. S. Jawahir and C. A. van Luttervelt, “Recent Developments in Chip Control Research and Applications,” *Ann. CIRP*, vol. 42, pp. 659–693, 1993.
- [15] V. C. Venkatesh and D. Q. Zhou, “A Study of Chip Surface Characteristics during the Machining of Steel*,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, no. 1, pp. 631–636, 1993.
- [16] M. Ogawa and K. Nakayama, “Effects of Chip Splitting Nicks in Drilling,” *CIRP Ann.*, vol. 34, no. 1, pp. 101–104, 1985.
- [17] M. Rahman, K. H. W. Seah, and V. C. Venkatesh, “Performance evaluation of endrills,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 28, no. 4, pp. 341–349, 1988.

- [18] "Cutting Tool Applications, Chapter 8: Drills and drilling operations," *American Machinist*. [Online]. Available: <http://www.americanmachinist.com/machining-cutting/cutting-tool-applications-chapter-8-drills-and-drilling-operations>. [Accessed: 15-Oct-2017].
- [19] J. S. Agapiou and D. A. Stephenson, *Metal Cutting Theory and Practice*, 3rd ed. CRC Press, 2016.
- [20] A. Parsian, "Dynamics of Torsional and Axial Vibrations in Indexable Drills," University West, 2015.
- [21] R. Edwards, *Cutting tools*, 1st ed. Leeds: Maney Publishing, 1993.
- [22] T. J. Drozda and C. Wick, "Machining," in *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, 4th ed., vol. I, 1983.
- [23] J. C. Roukema, "Mechanics and Dynamics of Drilling," University of British Columbia, 2006.
- [24] S. Wang, V. C. Venkatesh, and W. Xue, "A study on modification of endrills for finishing holes," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 28, no. 1–2, pp. 83–92, 1991.
- [25] V. C. Venkatesh and W. Xue, "A study of the built-up edge in drilling with indexable coated carbide inserts," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 58, no. 4, pp. 379–384, 1996.
- [26] P. Mathew and P. L. B. Oxley, "Predicting the Cutting Conditions at which Built-Up Edge Disappears when Machining Plain Carbon Steels," *CIRP Ann.*, vol. 29, no. 1, pp. 11–14, 1980.
- [27] V. C. Venkatesh, W. Xue, and D. T. Quinto, "Surface Studies during Indexable Drilling with Coated Carbides of Different Geometry," *CIRP Ann.*, vol. 41, no. 1, pp. 613–616, 1992.
- [28] H. Fujii, E. Marui, and S. Ema, "Whirling Vibration in Drilling. Part 2: Influence of Drill Geometries, Particularly of the Drill Flank, on the Initiation of Vibration," *ASME J. Eng. Ind.*, vol. 108, no. 3, pp. 163–168, 1986.
- [29] O. Tekinalp and A. G. Ulsoy, "Effects of Geometric and Process Parameters on Drill Transverse Vibrations," *J. Eng. Ind.*, vol. 112, pp. 189–194, 1990.
- [30] J. P. Davim, *Surface Integrity in Machining*, 1st ed. London: Springer London, 2010.
- [31] D. J. Whitehouse, *Handbook of Surface and Nanometrology*, 2nd ed. IOP Publishing, 2010.
- [32] B. Griffiths, *Manufacturing Surface Technology*, 1st ed. Penton Press, 2001.
- [33] "Mitutoyo: Quick Guide to Surface Roughness Measurement," 1984. [Online]. Available: http://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2012/11/1984_Surf_Roughness_PG.pdf. [Accessed: 20-Oct-2017].
- [34] M. Okada, N. Asakawa, E. Sentoku, R. M'Saoubi, and T. Ueda, "Cutting performance of an indexable insert drill for difficult-to-cut materials under supplied oil mist," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 72, no. 1–4, pp. 475–485, 2014.

- [35] P. Nieslony, P. Cichosz, G. M. Krolczyk, S. Legutko, D. Smyczek, and M. Kolodziej, "Experimental studies of the cutting force and surface morphology of explosively clad Ti-steel plates," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 78, pp. 129–137, 2016.
- [36] M. Okada, T. Ueda, and A. Hosokawa, "Cutting Characteristics of Indexable Insert Drill with Non-Axisymmetrical Geometry and Effects of MQL," *Trans. Japan Soc. Mech. Eng. Ser. C*, vol. 77, no. 783, pp. 4297–4307, 2011.
- [37] G. T. Smith, *Cutting Tool Technology*. London: Springer London, 2008.
- [38] M. Elbah, M. A. Yallese, H. Aouici, T. Mabrouki, and J. F. Rigal, "Comparative assessment of wiper and conventional ceramic tools on surface roughness in hard turning AISI 4140 steel," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 46, no. 9, pp. 3041–3056, 2013.
- [39] J. Guddata, R. M'Saoubi, P. Alma, and D. Meyer, "Hard turning of aisi 52100 using pcbn wiper geometry inserts and the resulting surface integrity," *Procedia Eng.*, vol. 19, pp. 118–124, 2011.
- [40] T. Özel, Y. Karpat, L. Figueira, and J. P. Davim, "Modelling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 189, no. 1–3, pp. 192–198, Jul. 2007.
- [41] D. Kurniawan, N. M. Yusof, and S. Sharif, "Hard Machining of Stainless Steel Using Wiper Coated Carbide: Tool Life and Surface Integrity," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 25, no. 6, pp. 370–377, May 2010.
- [42] Z. Q. Liu, P. Zhang, P. Guo, and X. Ai, "Surface Roughness in High Feed Turning with Wiper Insert," *Key Eng. Mater.*, vol. 375–376, pp. 406–410, 2008.
- [43] W. Grzesik, "Wear development on wiper Al₂O₃-TiC mixed ceramic tools in hard machining of high strength steel," *Wear*, vol. 266, no. 9–10, pp. 1021–1028, 2009.
- [44] W. Grzesik and T. Wanat, "Surface finish generated in hard turning of quenched alloy steel parts using conventional and wiper ceramic inserts," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 46, no. 15, pp. 1988–1995, 2006.
- [45] "MAS: MCV Line Vertical Machining Venters Catalog." [Online]. Available: <http://www.masmachinetools.com/mcv-1270-1>. [Accessed: 03-Mar-2017].

Anexos

Anexos

Figura A1: Aparas recolhidas da ferramenta 1













fz (mm/rot)	Vc 120 m/min	Vc 160 m/min	Vc 200 m/min
0,06			
0,08			
0,1			
0,12			

Figura A2: Aparas recolhidas da ferramenta 2











fz (mm/rot)	Vc 120 m/min	Vc 160 m/min	Vc 200 m/min
0,06			
0,08			
0,1			
0,12			

Figura A3: Aparas recolhidas da ferramenta 3

























fz (mm/rot)	Vc 120 m/min	Vc 160 m/min	Vc 200 m/min
0,06			
0,08			
0,1			
0,12			

Figura A4: Aparas recolhidas da ferramenta 4 (com geometria Wiper)

fz (mm/rot)	Vc 120 m/min	Vc 160 m/min	Vc 200 m/min
0,06			
0,08			
0,1			
0,12			

Tabelas A1: Potência consumida das ferramentas 1,2,3 e 4

		Vc (m/min)					
		120		160		200	
fz (mm/rot)	Ferramenta 1	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
0,06	Potência fuso (%)	10	21	10	26	10	30
0,08		9	22	10	24	9	32
0,1		10	24	9	27	10	35
0,12	Pot. Máx. 43 kW	10	26	9	30	10	39

		Vc (m/min)					
		120		160		200	
fz (mm/rot)	Ferramenta 2	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
0,06	Potência fuso (%)	10	21	9	26	10	26
0,08		10	23	10	29	10	30
0,1		10	26	10	33	10	36
0,12	Pot. Máx. 43 kW	10	28	9	36	10	37

		Vc (m/min)					
		120		160		200	
fz (mm/rot)	Ferramenta 3	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
0,06	Potência fuso (%)	10	21	10	26	10	30
0,08		9	22	10	24	9	32
0,1		10	24	9	27	10	35
0,12	Pot. Máx. 43 kW	10	26	9	30	10	39

		Vc (m/min)					
		120		160		200	
fz (mm/rot)	Ferramenta 4	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
0,06	Potência fuso (%)	10	23	11	28	10	30
0,08		10	24	10	32	9	33
0,1		10	27	9	36	10	36
0,12	Pot. Máx. 43 kW	10	30	10	39	11	40

Tabela A2: Precisão dimensional do diâmetro do furo das ferramentas 1, 2, 3 e 4

Ferramenta 1						
fz (mm/rot)	Nº furo	D. Ens 1 (mm)	D. Ens 2 (mm)	D. Ens 3 (mm)	D. Méd (mm)	Variação (mm)
Vc 120 m/min						
0,06	1	24,045	24,048	24,045	24,046	0,198
0,08	2	24,032	24,06	24,043	24,045	0,197
0,1	3	24,032	24,055	24,095	24,061	0,213
0,12	4	24,104	24,09	24,09	24,095	0,247
Vc 140 m/min						
0,06	5	24,045	24,043	24,062	24,050	0,202
0,08	6	24,05	24,055	24,08	24,062	0,214
0,1	7	24,033	24,038	24,03	24,034	0,186
0,12	8	24,045	24,04	24,036	24,040	0,192
Vc 160 m/min						
0,06	9	23,998	23,998	23,996	23,997	0,149
0,08	10	24,012	24,007	24,023	24,014	0,166
0,1	11	24,02	24,016	24,019	24,018	0,170
0,12	12	24,035	24,04	24,04	24,038	0,190

Ferramenta 2						
fz (mm/rot)	Nº furo	D. Ens 1 (mm)	D. Ens 2 (mm)	D. Ens 3 (mm)	D. Méd (mm)	Variação (mm)
Vc 120 m/min						
0,06	1	24,16	24,155	24,16	24,158	0,106
0,08	2	24,174	24,179	24,163	24,172	0,120
0,1	3	24,198	24,178	24,182	24,186	0,134
0,12	4	24,212	24,192	24,197	24,200	0,148
Vc 140 m/min						
0,06	5	24,165	24,165	24,162	24,164	0,112
0,08	6	24,19	24,18	24,17	24,180	0,128
0,1	7	24,205	24,168	24,18	24,184	0,132
0,12	8	24,233	24,212	24,194	24,213	0,161
Vc 160 m/min						
0,06	9	24,185	24,18	24,163	24,176	0,124
0,08	10	24,196	24,17	24,173	24,180	0,128
0,1	11	24,207	24,19	24,165	24,187	0,135
0,12	12	24,215	24,208	24,195	24,206	0,154

Ferramenta 3						
fz (mm/rot)	Nº furo	D. Ens 1 (mm)	D. Ens 2 (mm)	D. Ens 3 (mm)	D. Méd (mm)	Variação (mm)
Vc 120 m/min						
0,06	1	24,164	24,166	24,163	24,164	0,124
0,08	2	24,181	24,181	24,171	24,178	0,138
0,1	3	24,19	24,19	24,185	24,188	0,148
0,12	4	24,194	24,192	24,195	24,194	0,154
Vc 140 m/min						
0,06	5	24,17	24,157	24,16	24,162	0,122
0,08	6	24,161	24,178	24,175	24,171	0,131
0,1	7	24,167	24,183	24,175	24,175	0,135
0,12	8	24,187	24,17	24,185	24,181	0,141
Vc 160 m/min						
0,06	9	24,168	24,168	24,165	24,167	0,127
0,08	10	24,176	24,175	24,165	24,172	0,132
0,1	11	24,18	24,176	24,185	24,180	0,140
0,12	12	24,196	24,195	24,185	24,192	0,152

Ferramenta 4						
fz (mm/rot)	Nº furo	D. Ens 1 (mm)	D. Ens 2 (mm)	D. Ens 3 (mm)	D. Méd (mm)	Variação (mm)
Vc 120 m/min						
0,06	1	23,850	23,840	23,835	23,842	0,040
0,08	2	23,845	23,835	23,845	23,842	0,040
0,1	3	23,855	23,845	23,835	23,845	0,043
0,12	4	23,860	23,845	23,845	23,850	0,048
Vc 160 m/min						
0,06	5	23,840	23,825	23,835	23,833	0,031
0,08	6	23,835	23,830	23,825	23,830	0,028
0,1	7	23,840	23,830	23,825	23,832	0,030
0,12	8	23,855	23,850	23,840	23,848	0,046
Vc 200 m/min						
0,06	9	23,835	23,825	23,825	23,828	0,026
0,08	10	23,835	23,835	23,830	23,833	0,031
0,1	11	23,850	23,835	23,835	23,840	0,038
0,12	12	23,860	23,855	23,850	23,855	0,053

Tabela A3: Rugosidade média aritmética das ferramentas 1, 2, 3 e 4

Ferramenta 1					
fz (mm/rot)	Nº furo	Ra (µm) Ens1	Ra (µm) Ens2	Ra (µm) Ens3	Ra (µm) Média
Vc 120 m/min					
0,06	1	0,356	0,525	0,41	0,430
0,08	2	0,668	0,698	0,578	0,648
0,1	3	0,599	0,763	0,613	0,658
0,12	4	0,861	0,6	0,966	0,809
Vc 140 m/min					
0,06	5	0,38	0,356	0,469	0,402
0,08	6	0,501	0,654	0,646	0,600
0,1	7	0,72	0,906	0,762	0,796
0,12	8	0,884	0,701	0,698	0,761
Vc 160 m/min					
0,06	9	0,524	0,483	0,563	0,523
0,08	10	0,597	0,536	0,601	0,578
0,1	11	0,799	0,727	0,619	0,715
0,12	12	0,701	0,77	0,719	0,730

Ferramenta 2					
fz (mm/rot)	Nº furo	Ra (µm) Ens1	Ra (µm) Ens2	Ra (µm) Ens3	Ra (µm) Média
Vc 120 m/min					
0,06	1	0,653	0,591	0,635	0,626
0,08	2	0,784	0,739	0,747	0,757
0,1	3	0,754	0,693	0,752	0,733
0,12	4	0,832	0,726	0,849	0,802
Vc 160 m/min					
0,06	5	0,8	0,814	0,784	0,799
0,08	6	1,003	1,088	1,033	1,041
0,1	7	1,044	1,047	1,111	1,067
0,12	8	1,276	1,367	1	1,214
Vc 200 m/min					
0,06	9	0,745	1,05	0,686	0,827
0,08	10	1,028	1,119	1,035	1,061
0,1	11	1,33	1,13	1,036	1,165
0,12	12	1,21	1,278	1,492	1,327

Ferramenta 3					
fz (mm/rot)	Nº furo	Ra (µm) Ens1	Ra (µm) Ens2	Ra (µm) Ens3	Ra (µm) Média
Vc 120 m/min					
0,06	1	0,282	0,247	0,269	0,266
0,08	2	0,377	0,367	0,391	0,378
0,1	3	0,513	0,469	0,475	0,486
0,12	4	0,856	0,585	0,718	0,720
Vc 140 m/min					
0,06	5	0,563	0,551	0,516	0,543
0,08	6	0,6	0,657	0,542	0,600
0,1	7	0,774	0,712	0,722	0,736
0,12	8	1	0,954	0,814	0,923
Vc 160 m/min					
0,06	9	0,756	0,746	0,841	0,781
0,08	10	0,845	0,841	0,812	0,833
0,1	11	0,948	0,898	0,952	0,933
0,12	12	0,84	0,899	0,985	0,908

Ferramenta 4					
fz (mm/rot)	Nº furo	Ra (µm) Ens1	Ra (µm) Ens2	Ra (µm) Ens3	Ra (µm) Média
Vc 120 m/min					
0,06	1	0,303	0,262	0,495	0,353
0,08	2	0,41	0,684	0,484	0,526
0,1	3	0,297	0,427	0,367	0,364
0,12	4	0,495	0,455	0,464	0,471
Vc 160 m/min					
0,06	5	0,368	0,408	0,467	0,414
0,08	6	0,564	0,493	0,758	0,605
0,1	7	0,67	0,534	0,685	0,630
0,12	8	0,492	0,69	0,69	0,624
Vc 200 m/min					
0,06	9	0,302	0,378	0,858	0,513
0,08	10	0,369	0,6	1,146	0,705
0,1	11	0,754	0,525	1,125	0,801
0,12	12	0,965	0,778	0,955	0,899